

Schlussbericht

gemäß NKBF98

zur Bekanntmachung
„Optische Komponenten und Systeme für Volumenmärkte“

im Verbundvorhaben
Consumer-Mikrokameras –
Hergestellt mittels Mikrooptiktechnologien im Wafermaßstab
Akronym: CoMiKa

Teilvorhabentitel
Ultrapräzise Polymeroptik im Wafermaßstab

Zahlungsempfänger: Fresnel Optics GmbH Flurstedter Marktweg 13 D - 99510 Apolda	Förderkennzeichen: 13N9410
Teilprojektkoordinator: Stefan Gäbler 036 44/501 138 stefan.gaebler@fresnel-optics.de	Kaufmännische Betreuung: Doreen Köhler 036 44/501 129 doreen.koehler@fresnel-optics.de
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2008 – 31.12.2011	

Inhaltsverzeichnis:

1. Aufgabenstellung	2
2. Vorhabensvoraussetzungen	3
3. Planung & Ablauf des Vorhabens	3
4. Stand der Wissenschaft und Technik (2008)	5
5. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	6
AP000 Aufbau eines Duomer-on-Glass Mask Aligners (DOG-MA)	6
Umsetzung	6
Erprobung	7
AP100 Werkzeugherstellung	9
Galvanische Replikation der Master	9
Silikonabguss der Master	10
Analyse der Werkzeugmaster & Galvanowerkzeuge	10
Blenden	14
AP300 Replikation der optischen Strukturen mit UV-Reaktionsguss	15
Vergleich der Werkzeugkonzepte	15
Haftvermittlung (Glas – Polymer)	17
Rezeptur des Gießharzes	18
Entspiegelung von POG-Wafern	21
Demonstratoren	23
6. Verwertbarkeit der Ergebnisse	26
7. Relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite	26
8. Eigene Veröffentlichungen	26

1. Aufgabenstellung

Für Fresnel Optics stand die Aufgabe, die im Projekt definierten Linsenwafer in der geforderten Präzision herzustellen. Für zwei von drei ausgewählten Designs wurde FO als potentieller Hersteller ausgewählt, während ein drittes Design (ComiCON250) der Firma SUSS zugeordnet wurde. Die drei Demonstratoren erhielten im Projektverlauf Namen, die sich aus dem Projektnamen (Comi...), der Endanwenderfirma (SICK, Conti...) sowie der Pixelzahl in einer Zeile (250 bzw. 550/640) zusammensetzt. Es galt für Fresnel Optics, die geeignetste Basistechnologie zur Herstellung auszuwählen und für die speziellen Anforderungen weiter zu entwickeln. Dies sollte einhergehen mit der Entwicklung geeigneter Messroutinen und der Überführung der entwickelten Abläufe vom Laborversuch zur produktionsnahen Kleinserie. Einige Parameter der Linsenarrays sind in Tabelle 1 aufgelistet:

Tabelle 1 Anforderungsprofil der Linsenwafer des ComiSICK und ComiCON640-Designs

Objekt	ComiSICK			ComiCon 640			
				#1	#2	#3	
Base-Layer	µm	103	±10	100	128	50	±10
Pfeilhöhe (Sag)	µm	247		105	73	261	
Krümmungsradius (ROC)	µm	-797	±20	asph	asph	asph	
Ø-Linse	mm	1,15		1,13	1,80	2,17	
Spacer	µm	nein		nein	integriert		
Ø Apertur-Stopp	mm	1,04	±0,02	0,943	---	---	±0,003
Linsenfläche	%	25		5	25	50	
Glassubstratdicke	mm	1,10	±0,01	1,10	1,10	0,40	±0,02

2. Vorhabensvoraussetzungen

Im Vorfeld des Projektes waren verschiedene Investitionen getätigt worden, um z.B. die Fähigkeit des Heißprägens von mikro- und nanostrukturierten Optikkomponenten in neue Produkte zu integrieren sowie die Einführung neuer Technologien zur Verbesserung der Oberfläche von Kunststoffen voranzutreiben. Im EU-Projekt Walori (IST-2001-34646) wurden erstmalig Mikroasphären aus Kunststoff im Wafermaßstab für miniaturisierte Bildsensoren im Heißprägeverfahren hergestellt. Es wurde nachgewiesen, dass die Asphären auf einem 6" Wafer mit hoher Präzision aus Werkzeugoriginalen abgeformt werden können. Die Präzision geprägter Strukturen konnte auch in den Projekten X-Flaksa (13N8799) und KOMPHOR (A409-040110) demonstriert werden. Das im Thüringer Verbundprojekt NAOMI (B 409-99001) entwickelte Prinzip des Polymer-auf-Glas stellte eine Alternative zur Heißprägetechnologie dar. Da bei diesem Verfahren der Kunststoff auf einem Glasträger fixiert ist, können, neben verringertem lateralem Schrumpf auch bessere Ebenheiten der Elemente erreicht werden. Es stand eine manuelle Abformanlage für diese Technologie zur Verfügung, mit der ursprünglich Lentikulare von 20"-Diagonalenlänge mit Dickenschwankungen <35µm gefertigt wurden.

3. Planung & Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde als Verbundprojekt mit den Fraunhofer Instituten für Angewandte Optik und Feinmechanik bzw. für Zuverlässigkeit und Mikrointegration sowie sieben weiteren Firmen durchgeführt. Jeder Projektpartner hatte seinen eigenen Arbeitsplan (siehe Projektantrag). Durch regelmäßige Treffen wurden die Arbeitspläne aufeinander abgestimmt. Der inhaltliche Ablauf des Projektes bei Fresnel gliederte sich wie folgt:

04/2008 – 08/2009

Vorarbeiten mit elektrisch betriebenen Pressen zum Präzisionsheißprägen.

Fixierung des ersten optischen Designs: August 2009.

→Mastering durch Reflow (Sphären) bzw. Step & Repeat (Asphären) d.h. kein Einsatz von Präzisionsdiamantdrehen

Da diese Festlegungen die Grundlage aller maßgeblichen folgenden Arbeitsschritte darstellten, verzögerten sich selbige entsprechend.

Verwerfung von TAP2 (Herstellung von Linsenwafern mittels Heißprägen in PMMA) aufgrund folgender Widersprüche

→Vicat-Erweichungstemperatur von PMMA: $\sim 110^{\circ}\text{C}$ / th. Bonding bei $>150^{\circ}\text{C}$ erforderlich

→ α_{PMMA} : $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ / geringer thermischer Gang ($-40 \dots 80^{\circ}\text{C}$) erforderlich

→Heißprägen bei $\sim 200^{\circ}\text{C}$, Entformung bei 80°C / minimaler lateraler Schrumpf nötig

Die Vorarbeiten zur Erzielung der nötigen Abformgenauigkeiten in PMMA wurden damit, auf das Projekt bezogen, nutzlos.

Reaktivierung einer Anlage zur Polymer-on-Glas (POG) Abformung (TAP3)

→Dickengenauigkeiten von $\pm 30 \mu\text{m}$ auf 500 mm / spezifiziert $\pm 10 \mu\text{m}$ auf 200 mm

→ laterales Alignment nur visuell+manuell / spezifiziert $\pm 20 \mu\text{m}$

Die Notwendigkeit einer spezifikationskonformen Abformeinrichtung wurde erkannt.

Erste Klimatests mit Polymer-auf-Glas Planabformungen

Evaluation: Durchbiegung verschiedener Planabformungen POG auf unterschiedlich starken Glassubstraten →kritisch

Evaluation: lateraler Schrumpf beim Vernetzen des Harzes auf den Glasträgern

→Spannungen im Interface Glas-Polymer aber kein nennenswerter Schrumpf

Handling dünner Glaswafer (z.B. flächig saugender Vakuum-Chuck).

grundlegende Untersuchungen zur Entspiegelung von POG mittels Plasmaätzen.

09/2009 – 12/2009

weitgehende Fixierung der drei Optikdesigns durch das Konsortium

DOG-MA : Konzept spezifikationskonformer Abformeinrichtung; Sondierung & Selektion eines Kooperationspartners für die Herstellung desselben

selektive Aushärtung des Polymers (Belichtung durch Blenden): Idee & erstes Testlayout

Untersuchung verschiedener Monomermischungen + Glastypeen auf ihre spektrale Transparenz

01/2010 – 06/2010

Erprobung einer UV-LED-Lichtquelle (min. Wärmeeintrag beim Abformvorgang durch schmalbandige Belichtung um 395 nm)

Optimierung der Monomerzusammensetzung (Transparenz, Aushärtbarkeit bei 395 nm ; Klima- und UV-Stabilität)

Erprobung: Herstellung & Einsatz von Silikonwerkzeugen

Haftung & Klimastabilität von selektiv gehärteten Strukturen auf Glas bzw. Chrom
DOG-MA: Umwidmung von Projektmitteln; Erstellung Lastenheft; Start der Umsetzung

Mitte Juni 2010: Übergabe 1. ComiSICK-Master zur galvanischen Replikation

07/2010 – 12/2010

Galvanische Replikation des ComiSICK-Masters (2 Zyklen) zur schrittweisen Optimierung der Werkzeugparameter

Generierung von Silikonwerkzeugen des ComiSICK-Designs vom B-Master

Analyse von Master & Werkzeugen →große Schwankungen des ROC-Wertes im Master

Vergleich: Silikon- und Nickelwerkzeuge

Machbarkeit: Spacer aus Polymer, Spacer+Linse in einem Schritt abformen
Untersuchung des Schrumpfverhaltens am Design ComiSICK (ROC)
Vergleich Entspiegelung: Interferenzschichtsystem vs. Nanostrukturierung
Optimierung der Nanostrukturierung auf mech. & therm. Beständigkeit
Evaluation alternativer, kommerzieller Harzformulierungen (Brechzahl, Dispersion, Schrumpfung, Haftung, u.a.)
Abstimmung des erfolgversprechendsten Ansatzes zum Aufbau des ComiCon640-Stapels
Redesign & Herstellung des DOG-MA

01/2011 – 08/2011

Galvanische Replikation des ComiSICK Gen2 Masters (#3228) → immer noch zu hohe Schwankungen der Krümmungsradien über den Masterwafer
Inbetriebnahme und Debugging des DOG-MA
Abformungen des ComiSICK Gen2 Designs (#3228 Master bzw. MA1635-A+B) von Nickel und Silikon mit dem DOG-MA → Nickeltool zu große Dickenschwankung im Werkzeug
Untersuchungen zur Blendenintegration in Silikonwerkzeuge → Scheitern an zu starker Strahldivergenz der Lichtquellen, bzw. zu großem Abstand zwischen Blende & Polymerschicht
SOG-Tooling des ComiCON640 Gen2-1 Designs (A- & B-Master)
Charakterisierung der ComiCon (A & B)-Master aus Sicht von FO

09/2011 – 12/2011

DOG-MA: Implementierung einer alternativen Dickenmesseinrichtung
SOG-Tooling des ComiSICK Gen3 Masters (3538-D)
Abformungen des ComiSICK Gen3 Designs von SOG-tool auf Blendenwafer
Tooling & Abformung von POG-Spacer-Dummy für Fügetests (Lithoglas)
Abwarten der Ergebnisse der Projektpartner
Projektdokumentation

4. Stand der Wissenschaft und Technik (2008)

Kommerzielle Kleinkameras bestanden zu Projektbeginn aus hybriden Objektiv – Sensoraufbauten. Dabei wurden Objektiv- und Bildsensormodule getrennt voneinander hergestellt, eingehaust und erst im letzten Schritt, Kamera für Kamera, miteinander verbunden. Die Linsen und Blenden wurden typischerweise im Spritzgussverfahren (Plastik) oder durch Glasprägen (Glaslinsen) hergestellt und durch angespritzte Strukturen und das gemeinsame Gehäuse zentriert und auf Abstand gehalten. Die gefügten Baugruppen wurden dann auf ein Flexboard aufgesetzt, auf welches bereits der Bildsensor (normalerweise CMOS) montiert worden war, und mit dem Board verklebt. Die Bedürfnisse des dramatisch wachsenden Marktes für Minikameras erschienen mit dieser Technologie nur bedingt zu erfüllen. Dieses Problem wurde ebenfalls von einigen Großunternehmen wie Philips (durch die Ausgründung Anteryon) oder Canon erkannt, die ebenfalls Arbeiten zur parallelen Herstellung vieler Miniaturkameras im Wafermaßstab begannen. Eine Marktwirksamkeit dieser Ansätze war zu Beginn des Projektes jedoch noch nicht gegeben, was auf die Konzentration auf höchste Auflösungen und die daraus folgende große Bilddiagonale, selbst bei Nutzung kleiner Pixel und die daraus folgenden technologischen Probleme (z.B. Arrays stark asphärischer Mikrolinsen großer Scheitelhöhen usw.) zurückgeführt werden konnte.

5. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Durch maßgebliche Veränderungen der ursprünglichen technischen Ziele wurde eine grundlegende Restrukturierung des Teilprojektes erforderlich. Die geplanten Arbeiten in den TAP1+2 wurden zu großen Teilen hinfällig. Stattdessen kam der aufwändige Aufbau eines Entwicklungstools für POG-Abformungen als AP000 hinzu. TAP4 wurde zu TAP3 in AP300 inkludiert. Weiterhin findet das im Teilantrag inhärente AP800 (Projektmanagement) nun kurze Erwähnung.

AP000 Aufbau eines Duomer-on-Glass Mask Aligners (DOG-MA)

Die Spezifikationen der im Projekt entwickelten Optiken erwiesen sich als mit der bei Fresnel vorhandenen Abformtechnik weder im Heißprägen noch in der manuellen Polymer-auf-Glas-Technologie herstellbar. Daraus resultierte im Herbst 2009 die Entscheidung, ein entsprechendes nichtmotorisches Entwicklungstool zu schaffen, um das angestrebte Projektergebnis nicht zu verfehlen. Der sogenannte DOG-MA sollte eine kostengünstige Aligning- und Präzisionsabformkapazität speziell für die flexiblen Anforderungen von Fresnel Optics werden.

Umsetzung

Es folgen einige Bilder zur Illustration der Realisierung des Aufbaus. Abbildung 1 stellt links das Modell des ursprünglichen Gesamtaufbaus dar. Rechts im Bild sind die Optimierungen ersichtlich, die im Laufe der Projektlaufzeit realisiert wurden. Der Aufbau weist Handlingtische rechts und links von der eigentlichen Alignmenteinheit auf, die im Bild zum Teil abgeschnitten sind. In Abbildung 2 ist auf der linken Seite die gesamte Funktionseinheit als Foto zu sehen. Auf der rechten Seite des Bildes sieht man den Bildschirm zur Visualisierung der Kamerabilder von den Alignmentmarkierungen sowie die Steuereinheiten der UV-LED-Lichtquelle und einem chromatischem Dickensensor.

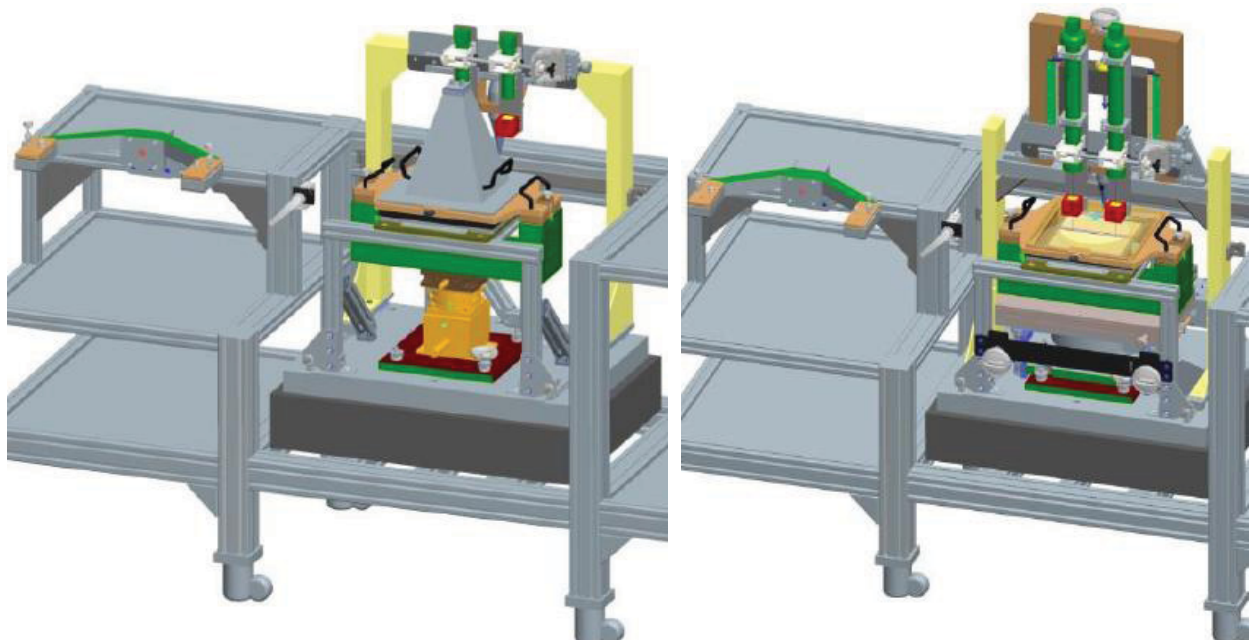


Abbildung 1 STP-Modell des DOG-MA in Ausgangskonfiguration (links) und nach Anpassung der Kamerasysteme und Versteifung des xyz-φ-Tisches (rechts)

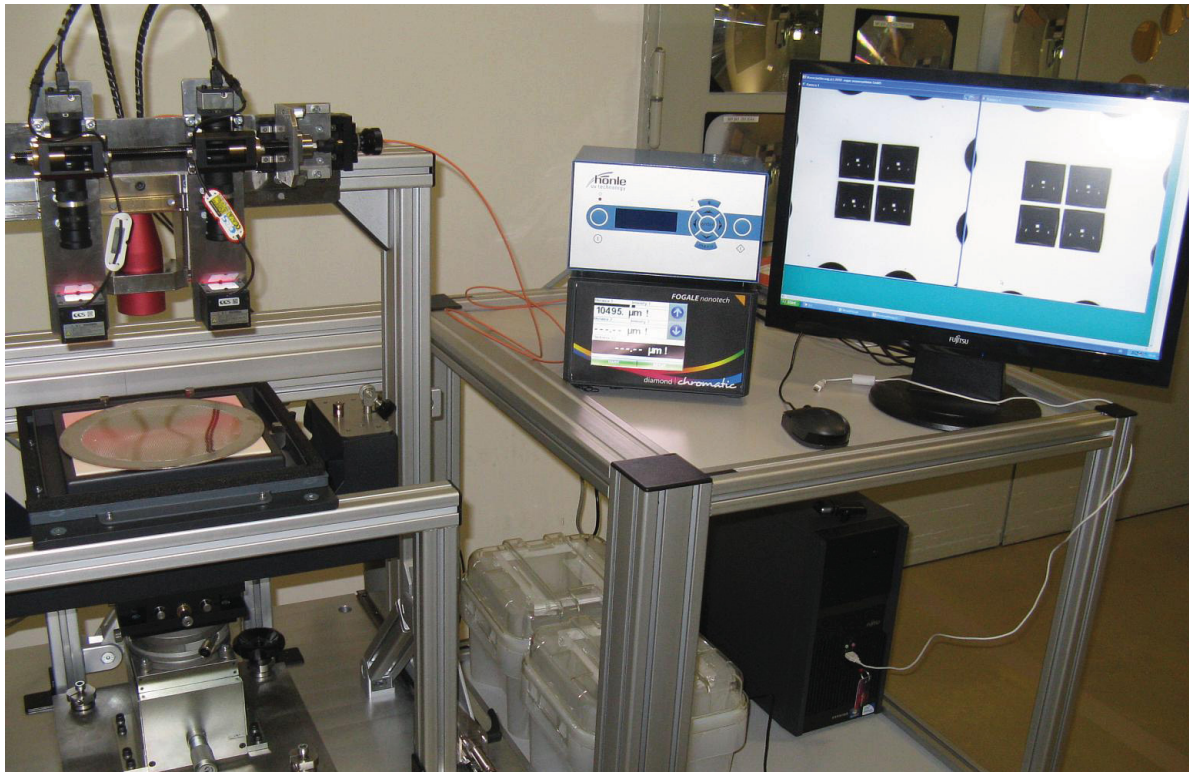


Abbildung 2 Foto des DOG-MA in V.1 mit Dickensensor und Kontrolleinheit für UV-LED; metallisches Werkzeug gespannt

Erprobung

Die Ermittlung der **Dickentoleranz** (TTV) einer Abformung erfolgte mit Hilfe des Tastschnittverfahrens. Es wurden Linienscans senkrecht und waagerecht über den Wafer durchgeführt, sowohl auf der Polymer- als auch auf der Rückseite. Die Messung über die Rückseite liefert Aufschluss über die Verbiegung des Wafers – in diesem Fall als Korrekturwert, grundsätzlich jedoch auch zur Einordnung der durch den Schrumpf beim Vernetzen entstehenden Spannungen. Im Rahmen des Comika-Projektes wurde keine strikte Grenze für die zulässige Verbiegung von Wafern festgelegt, jedoch ist minimale Verbiegung gewünscht, da sich sonst Probleme bei nachfolgenden Prozessen der AVT ergeben.

Der sogenannte **Keilfehler** gibt die Verkipfung zwischen Werkzeug und Substrat an. Er wurde praktikablerweise ebenfalls aus den Tastschnittwerten exzerpiert. Dabei wurden die jeweils gegenüberliegenden Randstufen vom unbeschichteten Substrat zur Polymerschicht verglichen und auf die maximale Gesamtbreite von 190mm extrapoliert. Der maximal zulässige Keilfehler ist innerhalb des Projektes auf 20µm beschränkt. Aufgrund der geringen Steifheit des Substrathalterturmes des DOG-MA in der Ausgangskonfiguration, führte jede nichtsym-metrische Spannung während der Abformung zu merklichen Keilfehlern und insgesamt meist zu nichttolerabel hohen Gesamtabweichungen. Daher wurden Kreuz- Hub- und Drehtisch durch steifere Varianten (teils im Eigenbau) ersetzt. Dadurch wurden zwischenzeitlich Werte $\leq 20\mu\text{m}$ erreicht.

Zusätzlich zu den Randdicken wurden die Mittendicken aus dem relativen Verlauf der Messkurve und der Verbiegung des Wafers bestimmt. Es ergaben sich sechs bis acht Dickenmesswerte, aus denen der größte und kleinste selektiert und verglichen wurden. Die Differenz der beiden Extrema wird im Folgenden vereinfachend als TTV-Wert (total

thickness variation) angesehen. TTV-Werte unter $30\mu\text{m}$ konnten erreicht werden. Für einige Designs waren jedoch Werte $<10\mu\text{m}$ gewünscht.

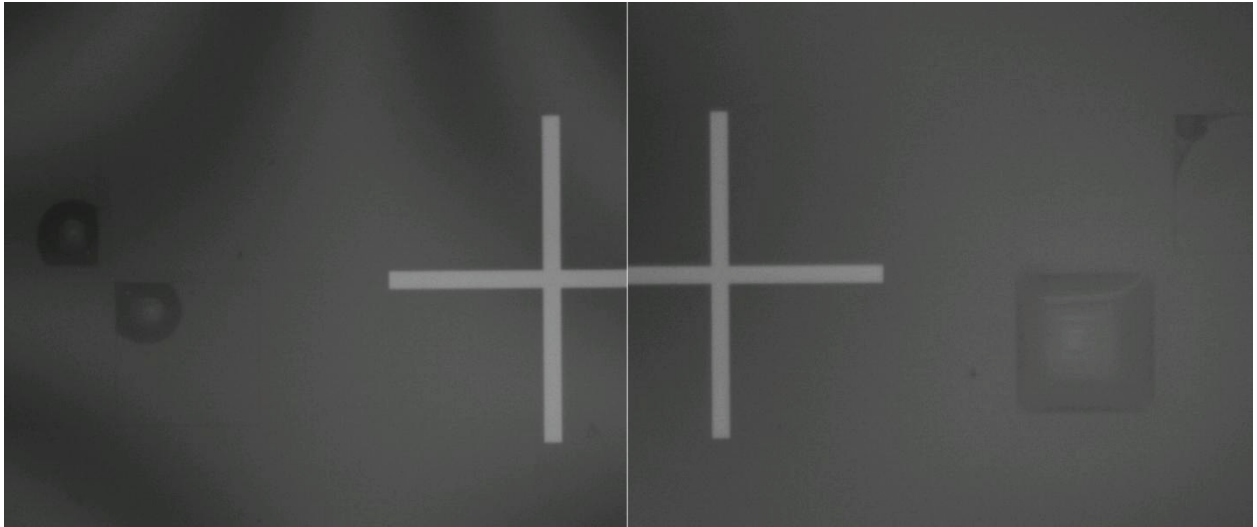


Abbildung 3 Screenshot des Kamerabildes eines Alignments (Schwarzchromlayer auf Glassubstrat zu Silikonwerkzeug) nach Benetzung mit UV-Harz) – Die Lage der kissenförmigen Strukturen ist nur noch aufgrund von Lufteinschlüssen zu erahnen

Der Aufbau des DOG-MA begünstigt konvexe bzw. konkave Schichtdickenverläufe durch die Aussparung im Substrathalter. Wirkt Druck auf das Substrat, so kann es sich leicht verbiegen. Eine Dickenvariation, wie sie daraus resultiert, ist jedoch nicht immer schädlich, sondern kann günstigenfalls auch förderlich sein, um systematische Werkzeugfehler auszugleichen. Die Alignmentgenauigkeit konnte in der Ausgangskonfiguration des DOG-MA in der ersten Konfiguration nicht hinreichend erprobt werden, weil die Bildqualität/Vergrößerung der Kamerabilder unzureichend war. Das ursprünglich verwendete 1,5fach vergrößernde System wurde durch ein 3fach-Objektiv ausgetauscht. Problematisch bei der Ausrichtung sind weiterhin die nahe beieinander liegenden Brechzahlen von Harz und (Silikon)werkzeug. Dies führt dazu, dass der Kontrast transparenter Strukturen verschwindet, sobald sie mit Harz benetzt sind (vgl. Abbildung 3).

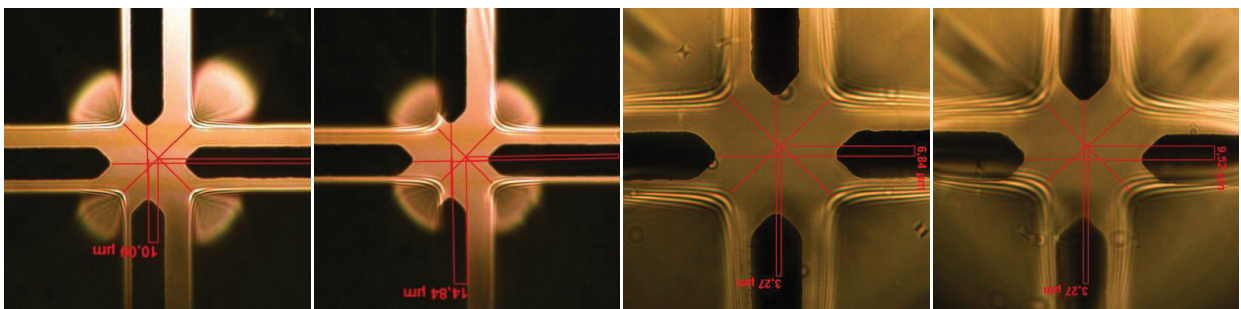


Abbildung 4 Durch Verbiegung gegeneinander verschobene Alignmentpaarungen bei ComiSiCK 3538-D-2-2 #04 (links) und ohne Verbiegung bei #11 (rechts) im Mikroskopbild (20xDF DL/AL)

Außerdem führt jede Durchbiegung eines der Fügepartner unweigerlich zur lateralen Verschiebung einzelner Strukturen gegeneinander. Da die Alignmentstrukturen nicht ganz außen auf den Wafern sitzen, sind selbige benetzt, ehe die finale Z-Verstellung erreicht wird. Im Mikroskopbild der erzielten Alignmentpaarungen zeigten sich bei höherer Vergrößerung entsprechende Abweichungen (siehe Abbildung 4 links). Der Effekt wird bei Einsatz eines massiven Substrathalters merklich verringert (siehe rechte

Seite). So konnten im Endeffekt spezifikationsgemäß Alignmentgenauigkeiten $\leq 10\mu\text{m}$ erreicht werden.

AP100 Werkzeugherstellung

Galvanische Replikation der Master

Die gesamte Fertigung bei Fresnel basierte historisch bedingt auf Nickelwerkzeugen, die mittels galvanischer Replikation von jeweiligen Masterstrukturen abgeformt wurden. Selbige können sowohl metallischer Natur sein als auch eine UV-Resist-Struktur auf einem Glaswafer. Letzteres erfordert jedoch eine elektrisch leitfähige Oberflächenbeschichtung als Startschicht. Der POG-Prozess war ursprünglich ebenfalls auf Nickelwerkzeuge zugeschnitten. Standardwerkzeugdicken liegen im Bereich um 2mm, was jedoch für die Anforderungen im Projekt als weitaus zu dick erschien. Auch das 8-Zoll-Format war bis dato ungebräuchlich, so dass angepasste Vorrichtungen usw. hergestellt und eigene Erfahrungen mit kleinen und dünnen Shims gesammelt werden mussten. Ein systematisches Problem der galvanischen Abformung ist, dass die Nickelschicht gewissermaßen knollig aufwächst und die resultierenden Shims rückseitig geschliffen werden müssen, um eine ebene Auflagefläche zu gewinnen. Da die Vorderseite jedoch die optisch aktiven Flächen trägt, kann man diese nur schwer aufspannen bzw. ergibt sich durch die Rückseitenbearbeitung ein gewisser Keil- und/oder Kissenfehler. Außerdem prägen sich Schleifspuren bei sehr dünnen Werkzeugen durch. Entsprechend bedurfte es einiger Anläufe um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Die Dicke der Ni-Shims wurde auf etwas über $400\mu\text{m}$ gedrückt, um ein ausreichend flexibles Werkzeug zu erhalten, das durch den Unterdruck an der porösen Werkzeughalterung plan gezogen werden kann (die Strukturtiefe lag bei gut $250\mu\text{m}$). Auch frontseitig musste das Werkzeug nachbearbeitet werden. Dies wurde erforderlich, da die Masterstrukturen als nicht leitfähige Polymer-auf-Glas-Teile vorlagen und entsprechend Leitfähigkeitsklebeband einzusetzen war, welches sich im Galvanikbad wellte und entsprechend im Nickelshim Abbildung fand. Da die Substratgröße vonseiten des Mastering im MaskAligner beschränkt ist und für die Galvanik 20mm umlaufender



Abbildung 5 Ausschnitt aus dem ersten Nickel-Shim (Muttergeneration) vom ComiSICK-Design (Master #2887-A) mit hervorstehenden Falten im Randbereich (links) und Stamper mit nachbearbeitetem Randbereich (rechts)

Rand eingehalten werden mussten, verkleinerte sich die freie Öffnung der Werkzeuge von ehemals 195mm auf ca. 175mm Durchmesser. Die Dickenhomogenität der Nickelshims überschreitet bereits den spezifizierten zulässigen Keilfehler und es erwies sich als unwirtschaftlich für jedes Werkzeug angepasste Vakuumspannvorrichtungen herzustellen. Weiterhin kann die Trennung der bestgeeigneten epoxidischen Harze von Metallwerkzeugen nicht gewährleistet werden. Aus diesen Gründen wurde vom klassisch metallischen Werkzeugkonzept bei Fresnel Optics Abstand genommen.

Silikonabguss der Master

Parallel zur Verwendung von Nickelwerkzeugen stand zu erproben, ob die ansonsten übliche Werkzeugform Silikon-auf-Glas auch für den hauseigenen POG-Prozess Anwendung finden könnte. Silikonmatrizen können im einfachsten Fall durch Übergießen des Masters mit einem geeigneten Silikon gewonnen werden. Jedoch erfordert die Spezifikation die Einhaltung eines maximalen Keilfehlers, u.a. der auf diese Weise nicht sichergestellt werden kann. Daher empfiehlt sich die Abformung in einem nachweislich planparallelen Aufbau, bzw. die Laminierung der Silikonmatrize auf ein formstabiles, möglichst UV-transparentes Substrat (z.B. Glas). Dabei kann wahlweise ein transparenter oder auch opaquer Master verwendet werden, insbesondere solange es sich um ein thermisch härtendes Silikon handelt. Günstigerweise liegt der Volumenschumpf hierfür unter 0,1%. Um spezielle Randgestaltungen des späteren Werkzeugs zu erhalten oder eine Antireflexstruktur zu inkludieren, bietet sich der Zwischenschritt übers Heißprägen in PMMA an. Der PMMA-Prägling kann dann einfach spanend oder chemisch bearbeitet werden und die Negativform des späteren Werkzeugs erhalten.

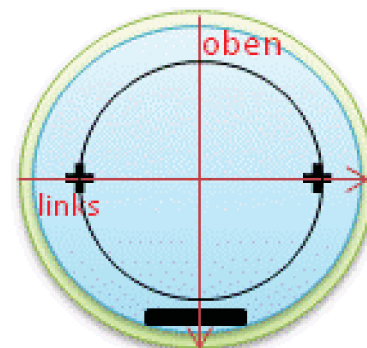


Abbildung 6 Skizze der Lage der Messlinien im Tastschnitt (rechts: grün= Substrat, hellblau = Polymer, Kreuze = Alignmentmarken, Pfeile = Messspuren)

Analyse der Werkzeugmaster & Galvanowerkzeuge

Zum ComiSICK-Design wurden seitens des IOF drei mal zwei Master mit den Nummern #2887-A-2 & -3, #3228-A-1 & -3 und #3538-D-1 und -2 geliefert. Von den ersten beiden Lieferungen (#2887 und #3228) wurde jeweils ein Master vergoldet, um Nickelwerkzeuge zu erzeugen. Der jeweils andere wurde in Silikon abgeformt. Die geometrische Charakterisierung erfolgte vor allem mit Hilfe von Tastschnittmessungen. In Abbildung 6 sind im schematischen Layout eines Linsenwafers die Lagen der Messlinien dargestellt.

Radienabweichung

Dies scheint sich zwischen Master und DOG-Abformung nochmals zu verstärken, wobei die Verkleinerung des ROC-Wertes mit ca. 20µm gegenüber dem Master für alle Linsen ungefähr gleich hoch ausfällt. Tabelle 2 zeigt ausgewählte Messwerte der Krümmungsradien und ihre Abweichungen über den Durchmesser der Master. (Rand bei 0 & 200mm, die Werte bei X=40 & 160mm betreffen jeweils die erste Linse innerhalb der Alignmentmarken.)

Tabelle 2 Charakterisierung der ComiSICK-Master

Charakterisierung der Sommer-Master																									
Abf #	ROC(x) von oben nach unten [µm]								ROC(x) von links nach rechts [µm]								Min	Avg	Max	shrink	Dev	±%	Dev	±%	
Master	X [mm]	10	40	70	100	130	160	190	10	40	70	100	130	160	190	µm	µm	µm		µm	±%	µm	±%		
#2887-A-3	Master	787	783	780	770	759	763	749	771	777	773	767	770	774	793	749	773	793		44	2,8%	24	1,6%		
#3228-A-2	Master		721	703	725					739	704	708				698	712	735				36	2,5%		
#3538-D-1	Master	726	745	746	743	741	734	659	689	746	743	739	746	749	706	659	729	749		90	6,2%	15	1,0%		
#3538-D-2	Master	648	731	735	733	742	745	717	703	740	743	737	737	736	671	648	723	745		97	6,7%	14	1,0%		

In den hinteren vier Spalten ist jeweils die Spannweite der Messwerte in Mikrometer bzw. als Schwankung in Prozent des Mittelwertes berechnet. Dabei beziehen sich die hintersten beiden Spalten nur auf den Bereich diesseits der Alignmentmarken, während die anderen beiden Spalten auch die Randbereiche des Wafers einschließen. Bei

Betrachtung der Gesamtfläche schneidet der erste Master #2887 am besten ab. Die letzten beiden Master sind im Innenbereich noch mal deutlich homogener.

Die Vergrößerung der Scheitelhöhen im Randbereich (entspricht einer Radienverringering) beim #3538-D-2 Master sind auch in den Tastschnitten der Abbildung 10 ersichtlich. Zahlenmäßig sind die Krümmungsradien für alle gelieferten Master zu klein. Spezifiziert waren $797\pm\mu\text{m}$. Master #2887 liegt mit $773\mu\text{m}$ mittlerem Krümmungsradius etwa am unteren Rand, während die anderen Master noch weiter weg liegen.

In Abbildung 7 ist der Verlauf der Krümmungsradien (ROC) der einzelnen Mikrolinsen über die Diagonale des Wafers vom Design #3228 aufgetragen. Jeder Messpunkt entspricht einer Mikrolinse. Es ist deutlich, dass die ROC-Werte im Zentrum des Wafers kleiner ausfallen als in Randnähe. Grundsätzlich sind für den dargestellten Master #3228 die ROC-Werte um $60\mu\text{m}$ zu klein. D.h. die Linsen sind zu stark gekrümmt und der tatsächliche Fokusabstand ist geringer als berechnet. Die ersten Abformungen (vom #2887) waren mit acrylatischen Harzen vorgenommen worden, bei denen sich die Messungen durch den höheren Schrumpf bei der UV-Vernetzung schwierig gestalteten, da es zu merklichen Durchbiegungen der Glaswafer kam. Die Ausrichtung der Wafer zur Tastspitze litt unter diesem Umstand, da selbige teils nicht plan angesaugt werden konnten. Die Messungen ergaben seinerzeit eine ca. 3%ige Zunahme der Krümmungsradien bei Abformung von Silikonwerkzeugen bzw. 6%ige Zunahme bei Abformung von Nickel, was in der Folge bei der Masterherstellung berücksichtigt wurde,

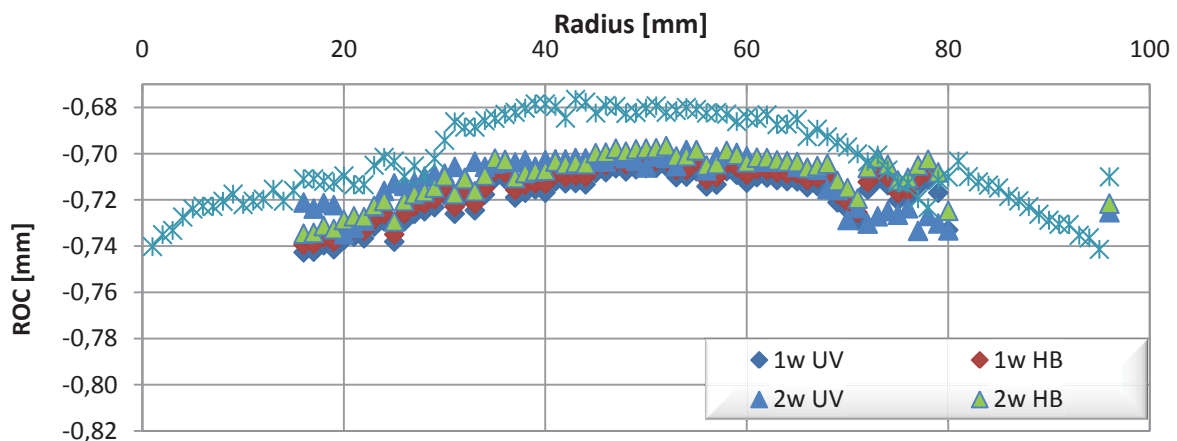


Abbildung 7 Krümmungsradien der ComiSICK-Linsen im #3228-A-Master und einer Abformung #3228-A-1-1-4 verglichen zum Zielfenster (-0,777...-0,817mm)

indem man einen Zielradius kleiner als der Soll-Bereich anstrebte. Spätere Abformungen wurden, wie erwähnt, mit epoxidischen Harzen vorgenommen, die sich genau umgekehrt verhielten. POG-Wafer wichen nun folgendermaßen von den Master ab: Die Krümmungsradien verringerten sich im Mittel um 1,5-2%. Dabei war die Veränderung im Zentrum des Wafers größer als am Rand.

Die Nickelwerkzeuge bzw. POG-Linsenwafer, die von diesen Master hergestellt wurden, sind verständlicherweise im Idealfall höchstens so genau wie die Masterstrukturen, weshalb besonderes Augenmerk auf deren Qualität gelegt werden muss.

Erste galvanischen Werkzeuge mit 0,7mm Nickelstärke, wiesen makroskopische Verbiegungen auf, die sich aufgrund der hohen Eigensteifigkeit nicht hinreichend gut mittels Unterdruck plan ziehen ließen. Folglich fielen POG-Abformungen wegen zu hoher Dickenschwankungen aus der Spezifikation. Weitere Abzüge wurden in einer

Stärke von 0,5 bzw. 0,4mm bestellt, verhielten sich jedoch nur unwesentlich günstiger. (vergleiche Tastschnitte in Abbildung 8 und Abbildung 9).

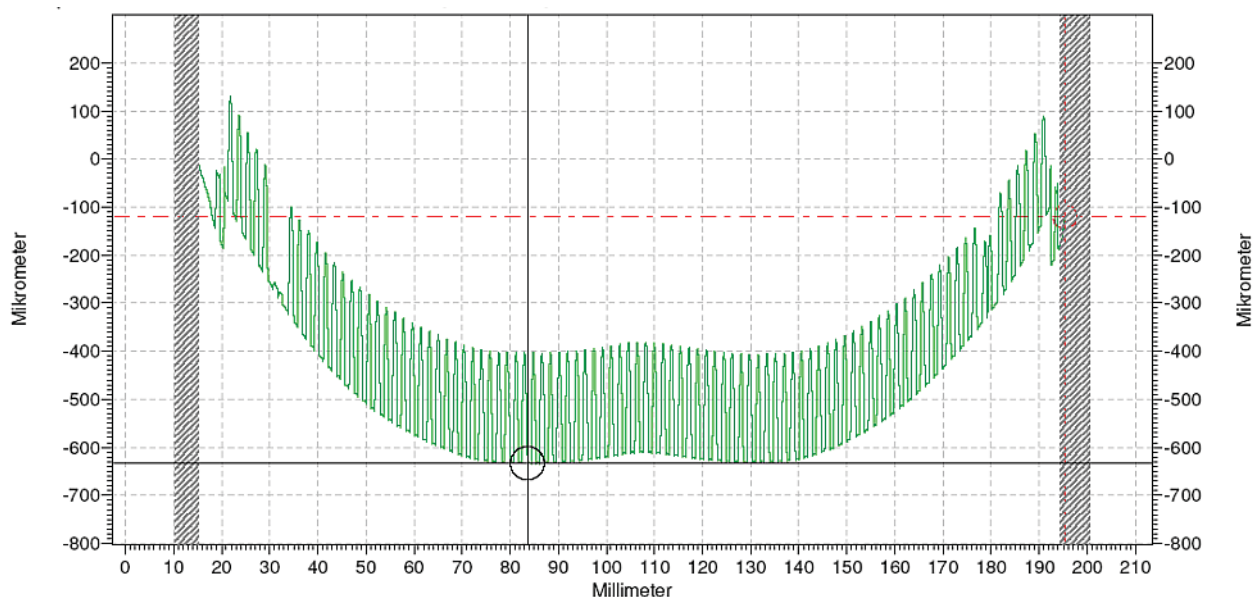


Abbildung 8 Nickelwerkzeug von 700µm Dicke: MA1635-A-1-1 (Positivgeneration von Master #2887)
Darstellung des Tastschnittrohprofils über die Alignmentmarken (vlnr)

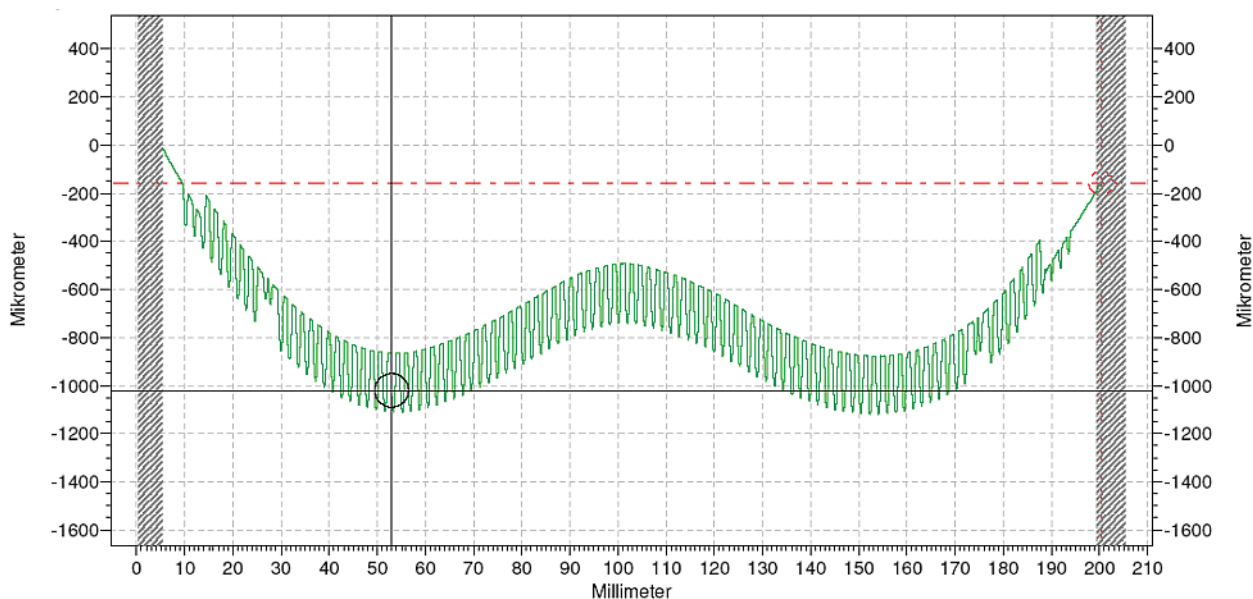


Abbildung 9 Nickelwerkzeug von 400µm Dicke: MA1635-B-1-1-1 (Negativgeneration von Master #3228)
Darstellung des Tastschnittrohprofils über die Alignmentmarken (vlnr)

Da die Strukturtiefe selbst schon gut 250 µm betrug (bei ComiSICK), ließ sich die Materialstärke nicht noch weiter verringern. Die erreichten Krümmungsradien erscheinen im Mittel ca. 20µm kürzer als in den Masterstrukturen. Die Gleichmäßigkeit ist vergleichbar.

Tabelle 3 Krümmungsradien der Mikrolinsen auf den Nickelwerkzeugen über den Waferdurchmesser, Abweichungen gegenüber den Ormocermastern und Gleichförmigkeit

	Abf #	ROC(x) von oben nach unten [µm]							ROC(x) von links nach rechts [µm]							Min	Avg	Max	shrink	Dev	±%	Dev	±%
Master	X [mm]	10	40	70	100	130	160	190	10	40	70	100	130	160	190	µm	µm	µm		µm		µm	
#2887-A-2	A-1-1	766	763	755	756	757	756	761	725	743	747	755	766	764	767	725	756	767	-2,2%	42	2,8%	23	1,5%
#2887-A-2	A-1-2-1	737	748	754	756	754	761	763	774	771	770	756	748	733	726	726	754	774	-0,3%	48	3,2%	38	2,5%
#3228-A-1	B-1-1-1	754	753	723	723	725	754	772	780	755	727	726	736	774	800	723	750	800	4,2%	77	5,1%	51	3,4%

Vom finalen Master #3538-D wurden ausschließlich SOG-Werkzeuge abgezogen. Die weichen Silikonwerkzeuge können nicht taktil charakterisiert werden und erst von den POG-Abformungen stehen Vergleichswerte zur Verfügung (vgl. Abbildung 10). **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** vom Master mit Abbildung 25 (von POG-Abformungen). Beispielhaft soll Abbildung 25 die Ähnlichkeit der Verhältnisse in der Abformung illustrieren. Eine Verkipfung der Spektren um ca. 20µm ist der Unterlage geschuldet. Abweichungen von diesem Wert sind mit Dickenschwankungen des Wafers und oder Verschmutzungen der Waferrückseite (Harzanhaftung u.a.) zu erklären.

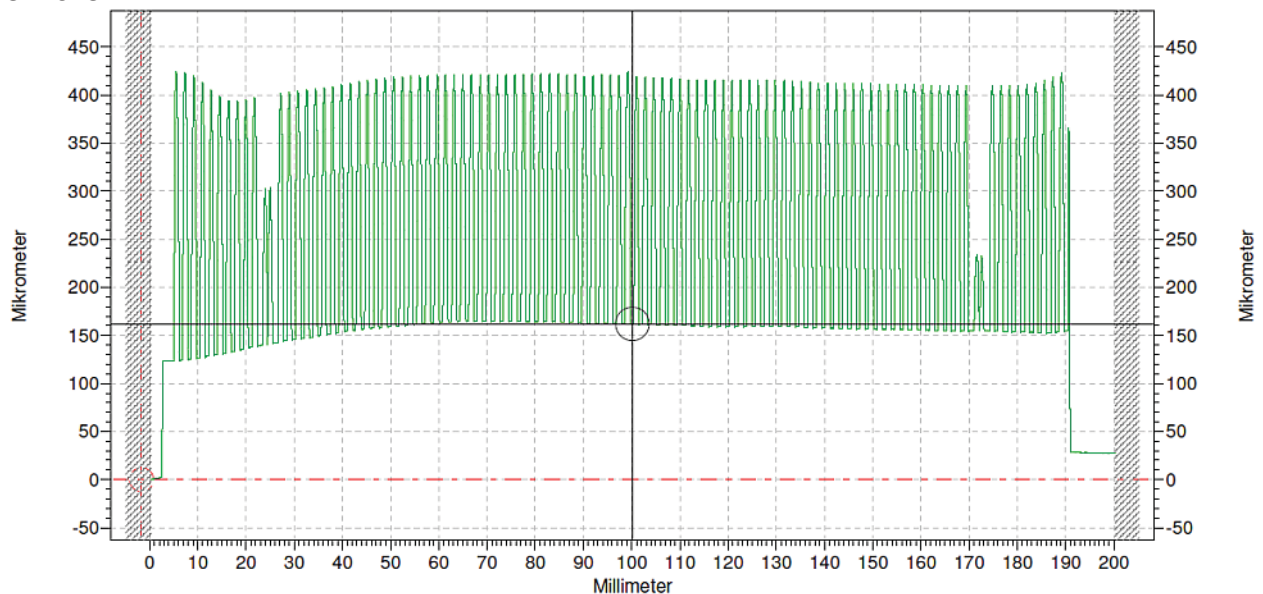


Abbildung 10 Master: #3538-D-2 Darstellung des Tastschnittprofils über die Alignmentmarken (vlnr)

Werkzeug-Unstetigkeitsstellen

Fehler im transparenten Master lassen sich wegen des niedrigen Kontrasts nur schwer visualisieren. Daher wurde hierfür ein Foto der vergoldeten Masterstruktur gewählt. In Abbildung 11 sind etwa ein halbes Dutzend Stellen erkennbar, wo mehrere Linsen beim Reflow des ComiSICK_Designs miteinander verschmolzen. Außerdem fallen Bereiche durch ihre niedrigere Reflektivität auf. Mutmaßlich rührt dies von einer großen Abweichung von der Zielkontur her. Diese Fehler übertragen sich 1:1 in spätere Werkzeuge, ungeachtet in welcher Technologie diese abgeformt werden.

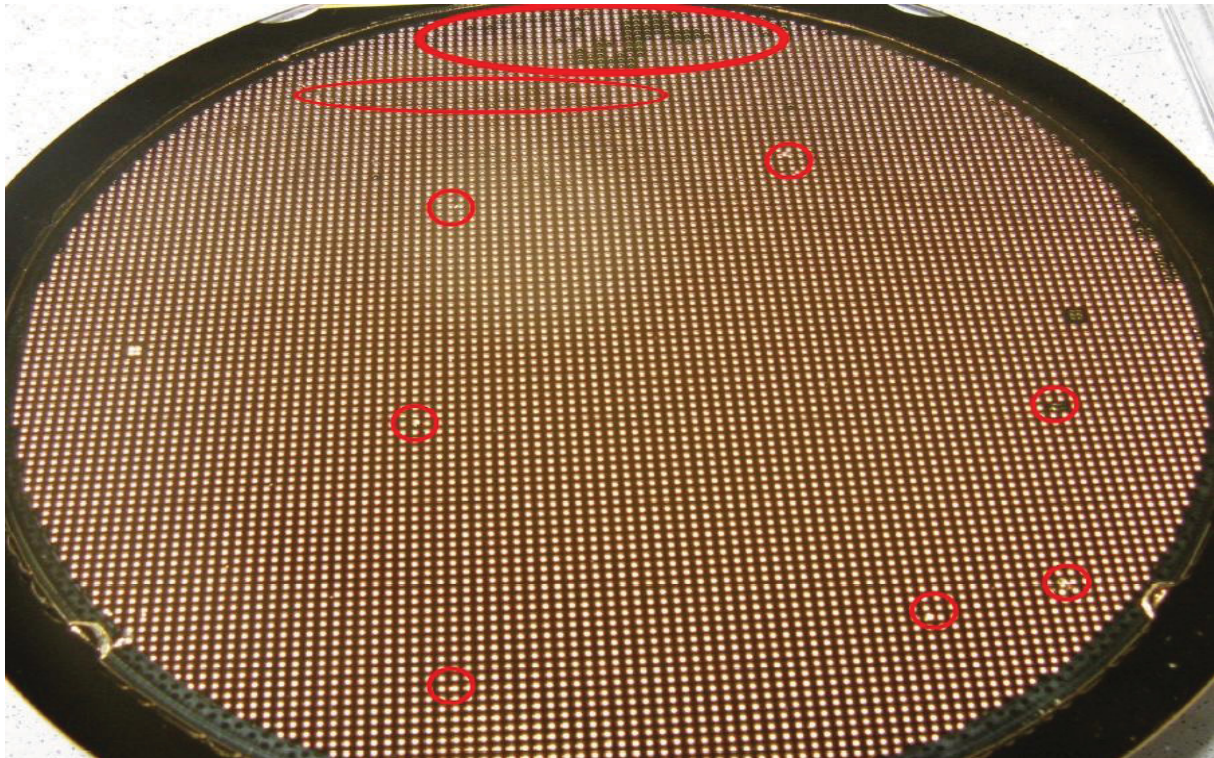


Abbildung 11 Werkzeugfehler im #3228-A-1-Master, sichtbar nach dem Vergolden

Laterale Abstände (Pitch)

Die lateralen Abstände waren für das ComiSICK-Design zu $\pm 20\mu\text{m}$ spezifiziert. Messungen an einem Linsenwafer zeigen, dass mehr als 95% aller untersuchten Linsen innerhalb von $\pm 10\mu\text{m}$ genau positioniert wurden (vgl. Abbildung 12).

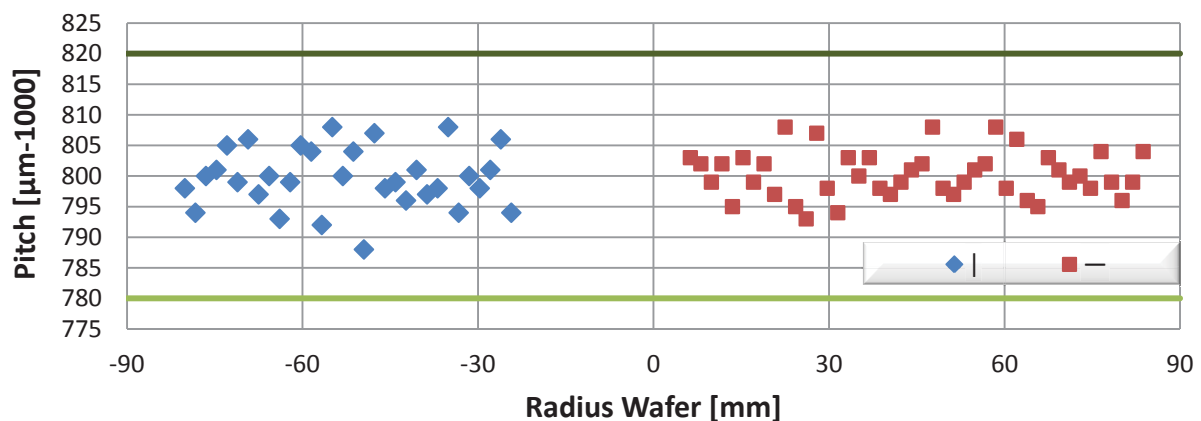


Abbildung 12 Laterale Abstände der Linsenzentren auf Linsenwafer #3228-A-2-1-3 gemessen für eine Reihe senkrecht und waagerecht auf dem Layout im Tastschnittverfahren.

Blenden

Blenden in optischen Systemen dienen in der Regel der Unterdrückung von Störlicht, welches aus undefinierten Quellen bzw. unter größeren Winkeln einstrahlt oder im System reflektiert wird. Dazu werden nichtgenutzte Flächenbereiche mit einem hochabsorbierenden bzw. hochreflektierenden Material beschichtet. Abbildung 13 zeigt die Unterschiede im sog. „Glare“-Anteil für beide Materialvarianten.

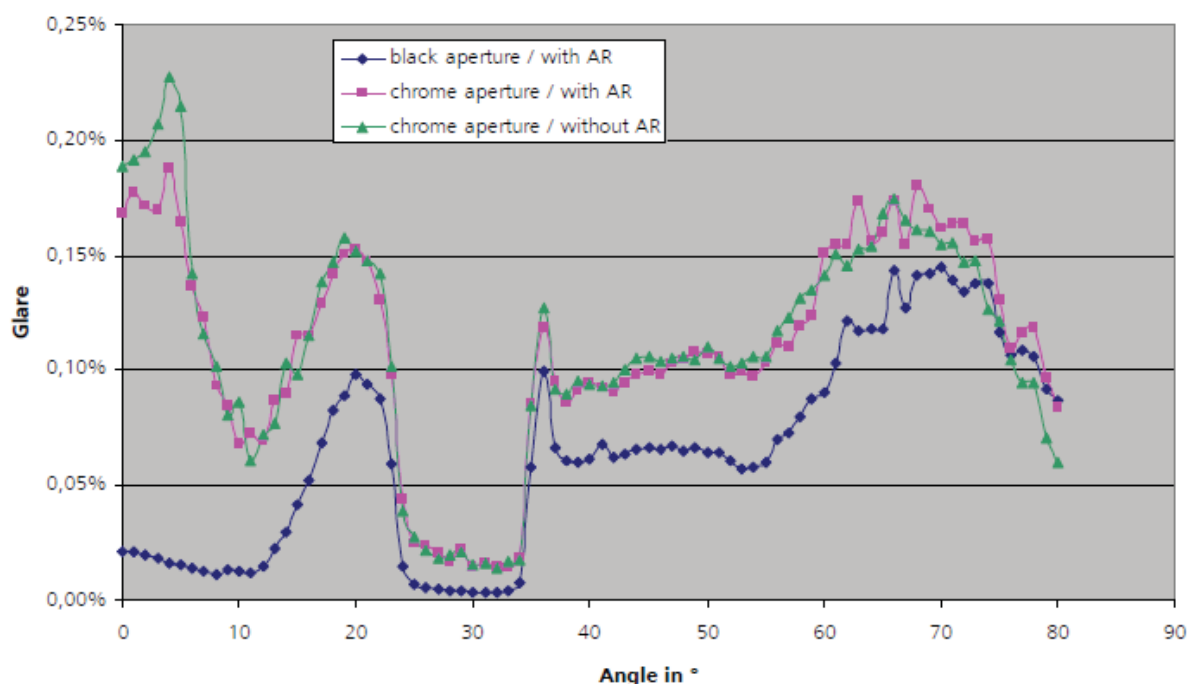


Abbildung 13 Glare-Anteile in Abhängigkeit vom Lichteinfallswinkel an ComiSICK für verschiedene Blendenmaterialien (Daten vom IOF)

Immanent ist ein hoher Kontrast zwischen dem transparenten Grundmaterial und der Blende, was den Blendenlayer zur Integration von Alignmentmarkierungen prädestiniert. (Marken in den transparenten Materialien sind deutlich schlechter sichtbar).

Blendenlayer aus hochabsorbierendem Polymer (PSK2000) wurden vom Fraunhofer IOF hergestellt und FO für das ComiSICK-Design übergeben.

Blendenlayer aus Chromoxid wurden bei der Schweizer Firma IMT für das ComiCON640-Design beauftragt; beide Designs sind in Abbildung 14 dargestellt.

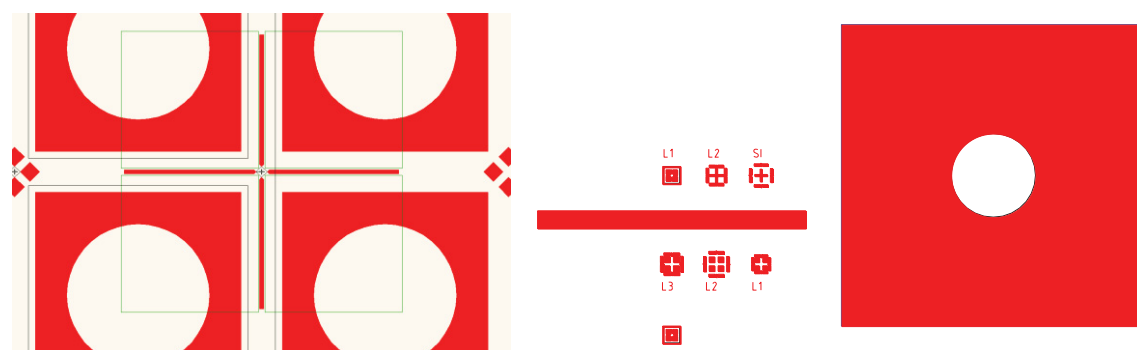


Abbildung 14 Aperturlayout ComiSICK (links) und ComiCON640#1 (rechts)

AP300 Replikation der optischen Strukturen mit UV-Reaktionsguss

Vergleich der Werkzeugkonzepte

In Tabelle 4 sind die Eigenschaften der beiden Werkzeugkonzepte im Einzelnen gegenübergestellt. Ausschlusskriterien für Nickel sind die unzureichende Trennbarkeit von den DELO-UV-Harzen und die unzureichende Planparallelität. Gleichzeitig ist Silikon auch aufgrund wirtschaftlicher Vorteile und schnellerer Zugänglichkeit zu bevorzugen.

Tabelle 4 Vergleich der Eigenschaften von Nickel & Silikonwerkzeugen

Material	Nickel	Silikon
Surface cure	unkritisch	für bestimmte Harze kritisch
Trennbarkeit	unzureichend für DELO-Materialien	grundsätzlich sehr gut
Erreichte Planparallelität	~100µm	~10µm
Herstellung	extern (PTC/USA)	vor Ort
Laufzeit	mehrere Wochen bis Monate	Wenige Tage
Kosten	~1000€	~100€
Haltbarkeit	quasi unbegrenzt	harzabhängig 10-100 Zyklen, Verstaubungsgefahr (Partikeleintrag) bei Lagerung durch Elektrostatik
Nutzbare Fläche	ca. 240cm ²	ca. 280cm ²
Belichtung	Nur durchs Substrat	Von beiden Seiten möglich
Besonderheiten	gute ARS-Transferfunktion	selektive Belichtung erschwert

Zu Projektbeginn arbeitete FO ausschließlich mit Nickelwerkzeugen. Es erwies sich jedoch, dass Silikonformwerkzeuge in vielerlei Hinsicht günstigere Eigenschaften aufweisen, jedoch spezielle Harze benötigen. Daher wurde viel Aufwand in die Modifikation der gebräuchlichen Harzrezepturen gesteckt bzw. nach kommerziellen Alternativen gesucht. Mit modernen Epoxidharzsystemen lassen sich Silikonwerkzeuge im Idealfall bis ca. 100 Zyklen verwenden

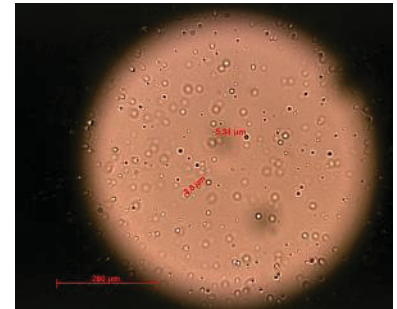


Abbildung 15 punktförmige Verschmutzungen auf einer Linsenoberfläche in POG

- das entspricht einem Bruttoausstoß von ca. 10^6 Mikrolinsen. Silikonwerkzeuge neigen aufgrund der elektrostatischen Aufladung zur Verschmutzung, während eine zuverlässige Reinigung sehr mühsam bzw. für mikrostrukturierte Oberflächen praktisch unmöglich ist. Massive Silikonwerkzeuge verschmutzen in kürzester Zeit auf der Rückseite und neigen so desto mehr zum Durchprägen lokaler Unebenheiten. Laminiert man eine Silikonschicht auf einen Glasträger, so umgeht man die Verschmutzung der Werkzeugrückseite und behält gleichzeitig die guten Trenneigenschaften bei. Gleichwohl verschmutzen die Silikonstrukturen mit der Zeit (vgl. Abbildung 15) und müssen demnach speziell staubgeschützt gelagert werden, um sie längerfristig als Abformwerkzeug verwenden zu können. Wiederholte Abformung hat wider Erwarten keinen hinreichend starken Reinigungseffekt auf das Silikonwerkzeug. Möglicherweise wird die Oberfläche der Silikonmatrize beschädigt oder die Partikel hängen in den Strukturen fest. Zu beachten ist weiterhin die hohe elastische Verformbarkeit des Silikonmaterials. Selbige führt insbesondere bei Einsatz eines höherviskosen Harzes dazu, dass die Einebnung der Basisschicht durch den Andruck des Substrats nicht ausreicht, da das Silikon elastisch ausweicht (vgl. Abbildung 16).

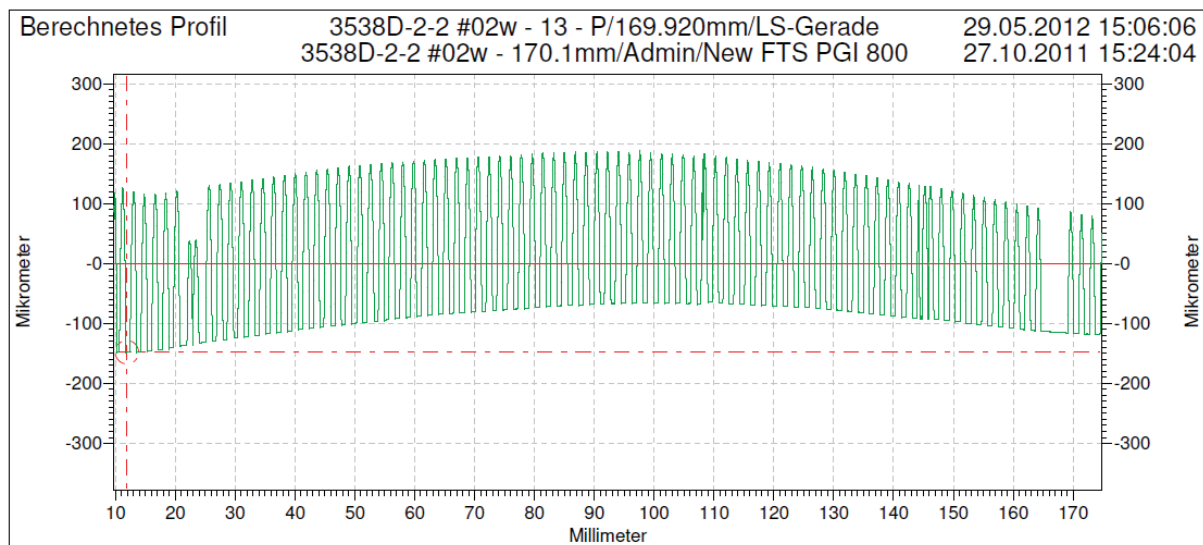


Abbildung 16 „haufenförmiger“ Basislayer aufgrund der elastischen Verformung des Silikonwerkzeuges - 2-2 (hohe Schichtdicke)

Abhilfe kann in gewissen Grenzen durch eine Minimierung der Silikonschichtdicke geschaffen werden, wie in Abbildung 17 gezeigt ist.

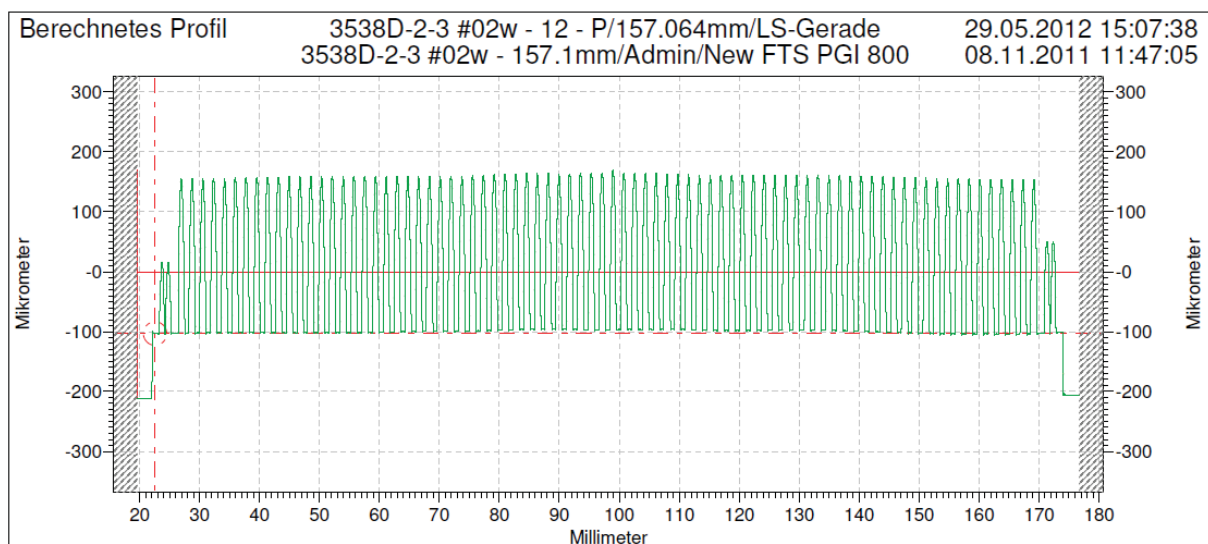


Abbildung 17 gleichmäßiger Basislayer bei Einsatz eines Silikonwerkzeuges minimaler Silikondicke -2-3

Haftvermittlung (Glas - Polymer)

Bis dato wurde ein spezieller Haftvermittler auf Siloxanbasis eingesetzt, in den die Glassubstrate vor der Beschichtung für einige Stunden getaucht wurden. Überschüsse der Chemikalie mussten dann abgespült und von der nichtbeschichteten Substratseite aufwendig abgereinigt werden. Eine nähere Untersuchung erwies, dass sich der Haftvermittler auch durch Fluten erfolgreich aufbringen lässt, wobei die Rückseite des Substrates kaum „verschmutzt“ wird und wesentlich weniger Chemie nötig ist als für ein Bad. Auch hierbei treten Überschüsse auf, die abgespült werden müssen und grundsätzlich sind bedingt durch das manuelle Handling kantennahe Bereiche problematisch. Es kann jedoch viel (Warte)zeit eingespart werden. Der logische nächste Schritt war die Aufbringung des Haftvermittlers im Spincoating, wo sowohl die Substratrückseite unbeschichtet bleibt als auch überschüssiges Material homogen, reproduzierbar und schnell abgeschleudert werden kann. Die Verwendung runder Substrate kam dieser Lösung entgegen (Unwuchthematik nicht runder Substrate).

Spezielle kommerzielle Harze, welche die Haftvermittlung zum Glas bereits beinhalten, bildeten die Spitze des hier Erreichbaren: Der Prozessschritt kann damit (zulasten erhöhter Materialkosten) komplett entfallen. Die zusätzlichen Kosten fallen für kleine Materialmengen, wie sie für wenige hundert Mikrometer dünne Schichten anfallen, kaum ins Gewicht und werden angesichts der massiven Einsparung an Arbeitszeit und Hilfsstoffen weitaus kompensiert.

Der Haftungs Aufbau ist jedoch ein sehr komplexer Vorgang mit verschiedensten, zum Teil unbekannten bzw. schwer quantifizierbaren Einflussgrößen. Bekannt sind Einflüsse der Schichtspannung, des Reinigungszustands, der Luftfeuchte bzw. des im Polymer eindiffundierten Wassers, der Einwirkdauer usw. Ungünstigerweise steht bis dato kein etabliertes Prüfverfahren für den quantitativen Vergleich der Schichthaftung zur Verfügung (z.B. ein Schältest mit Kraftmessung).

Rezeptur des Gießharzes

Unter dem AP000 wurden bereits einige vorbereitende Entwicklungsarbeiten zusammengefasst, die sich mit der UV-Lampe beschäftigen. An dieser Stelle soll es um die Gießharze gehen, die mit folgenden Anforderungen zu entwickeln waren:

Optische Eigenschaften

- hohe Transmission / geringe Absorption
- keine Schlieren, Partikel etc.
- niedrige Viskosität (Fließgeschwindigkeit, Anfälligkeit für Lufteinschlüsse)
- Absorptionskante außerhalb des VIS (kein Gelbstich)

Klimafestigkeit

Sowohl unter Einsatz als auch unter Herstellbedingungen darf

- Kein Vergilben, Eintrüben o.ä.
- Keine Ablösung vom Substrat
- Kein Reißen
- Kein Verzug der Konturen

auftreten. Einsatzbedingungen wurden von den Endanwendern spezifiziert, während sich die zu überstehenden Herstellbedingungen z.T. erst im Laufe des Projektes herauskristallisierten. Herausragend dabei ist die Anforderung des Reflowlötens für die optische Komponente, da dabei eine Erwärmung um bis zu 250K erfolgt und dies der Polymer-Glasverbund ohne Einschränkungen bewältigen muss.

Lösemittelbeständigkeit

- Von Monomerresten reinigbar
- Mechanisch beständig mindestens gegen Wischen mit lösemittelgetränktem Tuch

Experimentelle Optimierung der bestehenden Rezeptur

Die bei FOG verwendete Ausgangsrezeptur weist eine relativ gute Transmission bei für Acrylate verhältnismäßig geringem Schrumpfung von ca. 5,5% auf, ist jedoch vergilbungsanfällig bei höheren Temperaturen (Reflow!) und inhibiert bei Berührung mit Silikon (gewünschtes Werkzeugmaterial). Zugleich ist der verwendete Photoinitiator nur bis etwa 360nm sensibel und folglich inkompatibel zu UV-LED-Aushärtung bei 395nm.

Zur Kompatibilisierung mit UV-LED-Aushärtung und zur Einschränkung der Vergilbung wurden mehrere alternative Photoinitiatormischungen auf Basis von α -Aminoketonen und α -Bisacylphosphinoxidmischungen (sog. „BAPO“ blends) bemustert. Grundsätzlich führte der Einsatz von Initiatoren, die im kurzweilig visuell sichtbaren Bereich sensibel

sind, zu deutlich gelbfarbigen Polymeren (vgl. Abbildung 18 links). Speziell die BAPO-Mischungen haben jedoch die Eigenschaft, nichtumgesetzte Initiatorreste unter Lichteinwirkung weitgehend abzubauen, was zum „Ausbleichen“ anfänglicher gelblicher Färbungen führt. Der Farbeindruck ist weiterhin von der eingesetzten Konzentration des Initiators abhängig: Bei geringer Konzentration (wenige Zehntausendstel) ist fast keine Färbung auszumachen, wobei es einer gewisse Grenzkonzentration bedarf, um (gegen Silikon) zuverlässig durchzuhärten. Es stellten sich diverse Zwischenzustände ein, wo das Material durch die sogenannte Sauerstoffinhibierung noch oberflächlich flüssig verblieb, über weiche (vgl. Abbildung 18 rechts) und festere Zustände bis zur erstrebten harten und relativ kratzresistenten Erscheinung.

Desweiteren wurde das Verhältnis der eingesetzten Oligomere zu variieren, da diese eine stark unterschiedliche Viskosität aufweisen. Ziel war, zugunsten der Verarbeitbarkeit eine relativ niedrige Gesamtviskosität (ca. $<2000\text{mPas}$) der Oligomermischung einzustellen. Selbiges ging jedoch mit erhöhtem Schrumpf beim Vernetzen und damit verbunden verstärkten inneren Spannungen einher, die zum Zerreissen führen können, das Ablösungsrisiko erhöhen bzw. dünnere Substrate merklich verbiegen (vgl. Abbildung 19).

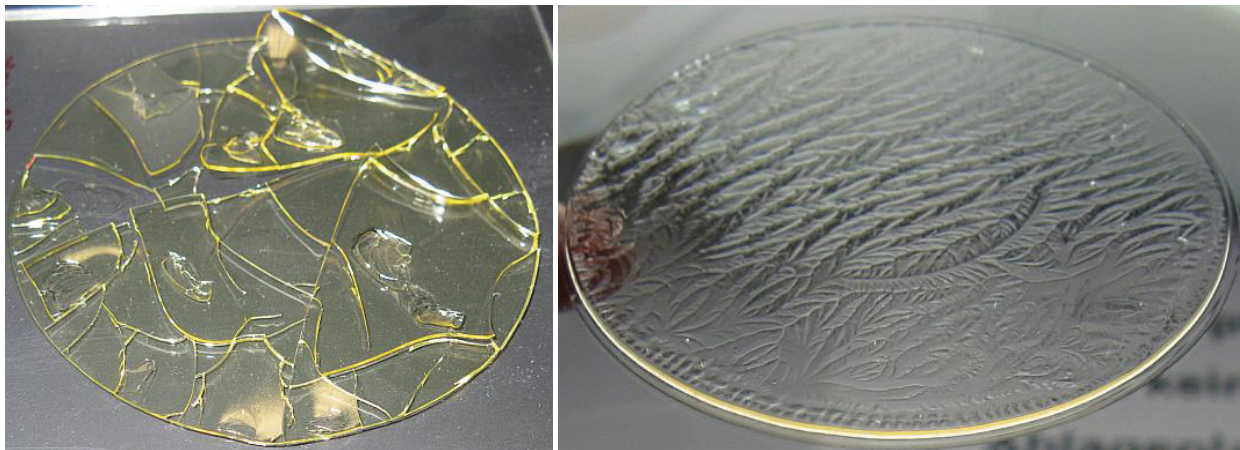


Abbildung 18 vergilbtes Polymer, gerissen und delaminiert im Wärmeschrank (links), unzureichende Oberflächenhärtung (rechts)



Abbildung 19 Verbiegung durch 300µm starke Polymerschicht auf 400µm Glassubstrat (10 x 10 cm)

Weiterhin wurde der Einsatz eines sog. Thermostabilisators geprüft, die Dauer der Haftvermittlungsbehandlung sowie die eingesetzte UV-Dosis variiert und die Ergebnisse mit den oben dargestellten Anforderungen abgeglichen. Beispielsweise wurden Probekörper einer 7tägigen Wärmebelastung bei 130°C ausgesetzt. Einige der Muster haben sich komplett vom Glassubstrat abgelöst, andere sind unterschiedlich kleinteilig zerrissen. In letzterem Fall ist häufig ein Bruch innerhalb des Glasträgers zu verzeichnen, was auf eine ausgezeichnete Verbindung zwischen Polymer und Substrat hindeutet. Es wurden jeweils 500µm starke Polymerschichten auf 2mm dicken 4“-Glasträgern aus B40 aufgebracht.

Es konnte eine Rezeptur gefunden werden, mit der relativ überzeugende Ergebnisse erzielt wurden. Klimatests nach DIN ISO 9022-2 folgender Beanspruchungsart-Schärfegrad-Kombinationen wurden anstandslos bestanden:

- 10-08 (Kälte), 11-05 (Wärme)
- 12-01 (feuchte Wärme)
- 14-02 (langsamer Temperaturwechsel) sowie
- 16-01 (feuchtwarmes Wechselklima mit Betauung)

Ein dem Reflowprozess nachempfunder Extremtest mit 15min bei 300°C sowie sehr schneller Aufheizung und Abkühlung führte an selektiv belichteten Mustern auf Chromblende zu dem in Abbildung 20 gezeigten Ergebnis: Größere zusammenhängende Polymerflächen reißen und lösen sich teilweise vom Glassubstrat. Die transparente Erscheinung bleibt jedoch erhalten und die Haftung kleiner (etwa Ø2mm) Polymerinseln bleibt unbeeinträchtigt bestehen.

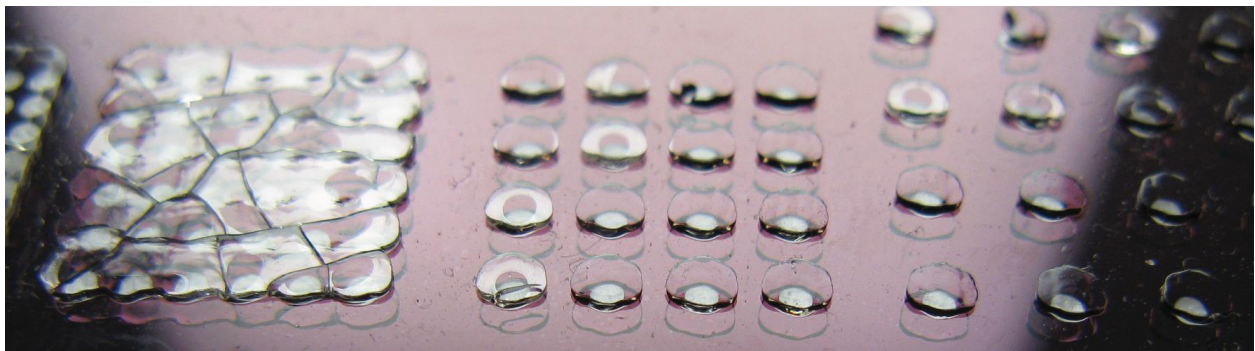


Abbildung 20 POG (selektive Belichtung) nach 15min bei 300°C (u.a.): stellenweise Ablösung (hell erscheinende Stellen, die nicht der Blendenöffnung entsprechen) und inneres Reißen größerer Polymerinseln (Kantenlänge des linken Bereiches ca. 15-20mm)

Parallel zu der Anpassung der hauseigenen UV-Harz-Rezeptur wurden verschiedene kommerzielle Materialien, Diese zeichnen sich durch verringerten Schrumpf bei teilweise deutlich geringerer Viskosität aus. Zugleich sind verschiedene Dispersionen, Glasübergangstemperaturen usw. verfügbar und für einige Materialien wird Löttauglichkeit garantiert. Die DELO-Materialien zeichnen sich darüber hinaus durch integrierte Haftvermittlung aus, sind daher jedoch nicht mehr mit Metallwerkzeugen kompatibel und ebenfalls nicht mit UV-LED auszuhärten. Die optimalen Aushärteparameter (vgl. Tabelle 5) wurden teils durch den Hersteller vorgegeben, teils experimentell bestimmt. Anhand von Musterabformungen wurde das eingangs aufgelistete Anforderungsprofil abgeprüft, wie in Tabelle 6 auszugsweise dargestellt.

Tabelle 5 Empfohlenes Regime zum Aushärten der verschiedenen UV-Harze (UV-LED bei 395nm, Quecksilberstrahler quasikontinuierlich mit charakteristischen Peaks)

Curing					Tempern		Altern
WL	s	mW/cm ²	s	mW/cm ²	°C	min	h
LED/Hg	50	40	12	210	---	---	---
Hg	120	25	>10	210	80°C	15	24
Hg	180	25	n.a.	210	120	60	24
Hg	180	25	n.a.	210	120	60	24
Hg	240	25	n.a.	210	120	60	24
Hg	300	25	n.a.	210	120	60	24
LED/Hg	360	25	n.a.	210	50	10	---
Hg	360	25	n.a.	210	120	60	24

Tabelle 6 experimentell ermittelte Eigenschaften der DELO-UV-Harze

η mPas	Schrumpf vol %	Farbe	Kratzer	Verarbeit- barkeit	Härte	Haftung	Trenn- mittel	Sil-Wkz	Ni-Wkz	UV-LED	thermisch
400	5,5	leicht gelblich	++	++	sprödhart	+	D,S,W	+	++	++	200°C/10min
400	4,6	transparent	++	++	steigend	++	n.m.	++	n.m.	-	200°C/10min
400	4,5	transparent	++	++	steigend	++	D,S,W	++	O	-	200°C/10min
840	3	transparent	++	++	steigend	++	n.m.	++	O	-	200°C/10min
4000	2,3	transparent	++	+	steigend	++	n.m.	++	n.m.	-	200°C/10min
8200	2,3	transparent	++	O	steigend	++	D	++	O	-	200°C/10min
5500	5,5	regenbogen	O	-	sprödhart	++	D,W,S	--	O	O	200°C/10min
3000	3,2	leicht gelblich	++	+	steigend	++	W,D	++	O	-	200°C/10min
2600	3,3	leicht gelblich	++	+	steigend	++	n.m.	++	O	-	200°C/10min

Neben der technologisch getriebenen Tendenz zur Verwendung von Epoxiden ließ auch der Kostenfaktor für Blenden (kann >4/5 der Linsenwaferkosten betragen) und die Erfordernis einer zuverlässigen nasschemischen Reinigung (die gleichzeitig bestehende Strukturen nicht angreift) zu dieser Variante tendieren.

Entspiegelung von POG-Wafern

Um Störlicht/Geisterbilder zu unterdrücken und den Transmissionsgrad der Optiken zu erhöhen, sollte die Möglichkeit einer Entspiegelung erprobt werden.

Neben klassischen Breitband-Antireflex-Beschichtungen führte Fresnel Optics auch Versuche zur Entspiegelung durch Nanostrukturierung (PlasmAR®-Strukturen) durch. In vorhergehenden Projekten (FOKUS u.a.) war diese Art der Entspiegelung schwerpunktmäßig für thermoplastische Polymere weiterentwickelt worden. In Comika nun galt es, Polymerartige Acrylate bzw. Epoxide zu entspiegeln. Es zeigte sich u.a. dass der PlasmAR-Prozess sensibel auf den Aushärtungszustand des Polymers reagiert: Wenn die Schicht nicht durchgehärtet ist, führt der Plasmaätzprozess zu sehr diffusen Oberflächen – ansonsten wird eine klare Entspiegelung erzielt. Der klassische PlasmAR-Prozess funktioniert jedoch nicht mit diesen Materialien; Entspiegelung tritt erst nach sehr langer Behandlung und dann sehr unreproduzierbar auf. Sehr gute Entspiegelungsergebnisse wurden jedoch mit der weiterentwickelten Variante mit Keim- und Deckschicht erzielt (nähere Beschreibung im FOKUS-Projektbericht). Neben einer gegenüber klassischen Breitband-AR-Systemen leicht verbesserten mittleren Entspiegelung wird auch eine beachtliche Stabilität der Nanostrukturen erreicht. Die Strukturen werden (im Unterschied zu PMMA-Grundmaterial) mit Lösungsmittel reinigbar, ohne merklich an AR-Performance einzubüßen. Dies ist wohl vor allem der lösemittelbeständigen Grundmaterialsubstanz zuzuschreiben, die bei PMMA/PC schlichtweg nicht gegeben ist. Entspiegelungsergebnisse sind weitestgehend reproduzierbar. Es ist jedoch sorgfältig auf den Konditionierungszustand der Vakuumbeschichtungsanlage zu achten. Bei thermischer Belastung der Nanostrukturen deutlich über der Glasübergangstemperatur des jeweiligen Polymers (z.B. 5min bei 200°C), bilden sich die Strukturen weitgehend zurück und der AR-Effekt verschwindet. Die entsprechenden Glasübergangstemperaturen für die im Projekt favorisierten Harze liegen zwischen 90°C (und 120°C).

Da die Glas-Planflächen der Linsenwafer in der Regel auf einen Imager bzw. ein Deckglas gekittet werden, ist für diese Flächen keine Entspiegelung vonnöten. Eine AR-Beschichtung wäre im Gegenteil womöglich schädlich, da selbige zusätzliche Spannungen ins Substrat einbringt und Haftungsprobleme verursachen kann.

Ausgewählte Entspiegelungsergebnisse sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 aufgeführt.

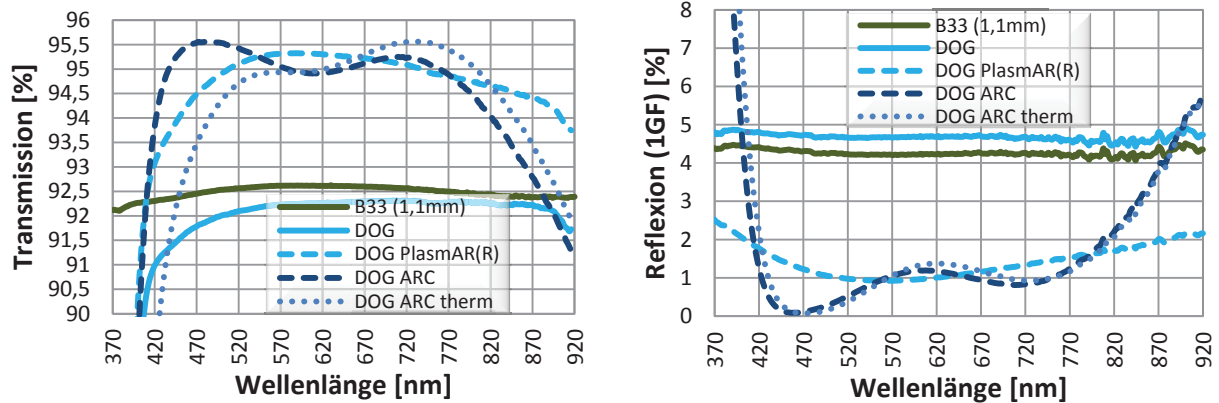


Abbildung 21 Transmission und Reflexionsspektren einer niedrigbrechenden Harz-Planabformungen (500µm Polymer auf 2mm B33 Substrat) unbehandelt, mit AR-Coating und AR-Struktur PlasmAR (therm steht für Zustand nach 10min bei 200°C)

Die PlasmAR®-Entspiegelung hingegen erfolgt nur auf den mit Polymer belegten Flächen (nicht auf Glas), weil anorganische Materialien von dem Sauerstoffplasma nicht signifikant angegriffen werden. Ein weiterer entscheidender Vorteil der PlasmAR-Entspiegelung ist deren Breitbandigkeit, durch welche auch steile Flanken der Linsenränder wirksam entspiegelt werden. Beispiele für entspiegelte Linsenwafer sind in Abbildung 23 dargestellt.

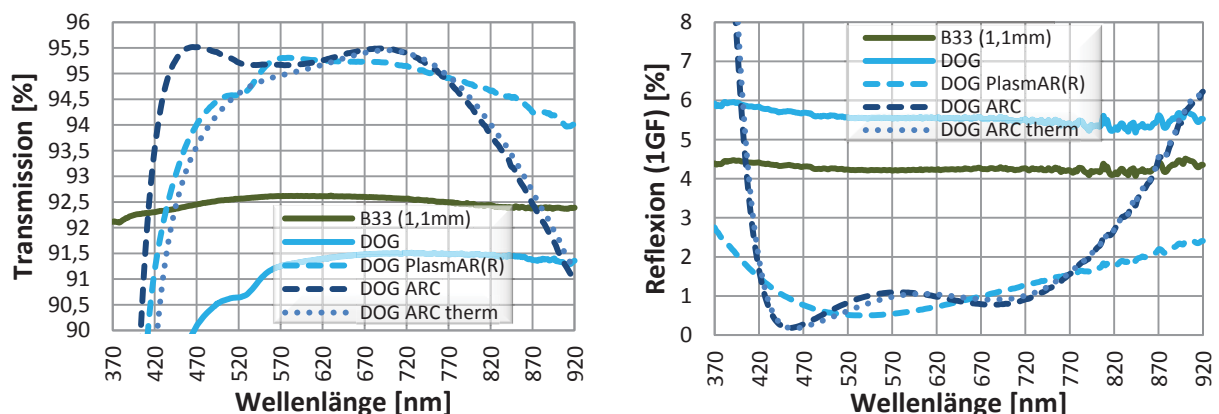


Abbildung 22 Transmission und Reflexionsspektren einer hochbrechenden Harz-Planabformungen (500µm Polymer auf 2mm B33 Substrat) unbehandelt, mit AR-Coating und AR-Struktur PlasmAR (therm steht für Zustand nach 10min bei 200°C)

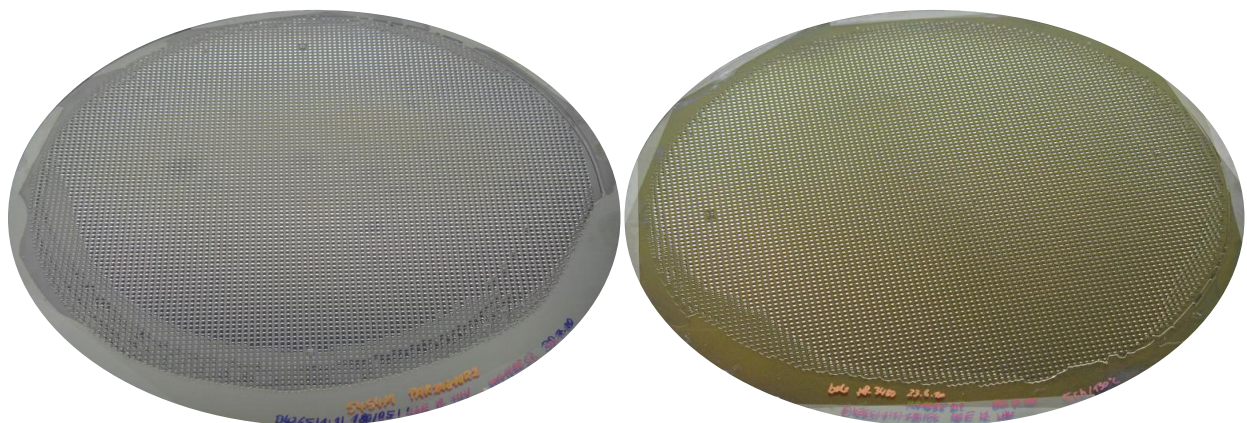


Abbildung 23 Entspiegelung von POG-Wafern (hauseigene Harzmischung = acrylatisch) im ComiSICK-Design (Handabformung): PlasmAR® KS/DS einseitig (links), klassisches ARC beidseitig (rechts)

Demonstratoren

ComiSICK

Für den ComiSICK-Sensorchip (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Abbildung 24 rechts) oblagen die obersten beiden Lagen (Polymerlayer mit Linsen und 1,1mm Glassubstrat) FOG. Das darunterliegende Imagerdeckglas und der Siliziumchip lagen im Verantwortungsbereich von Lithoglas bzw. Awaiba. Galvanische Nickelwerkzeuge erwiesen sich als ungenügend (vgl. Seite 9). Von insgesamt vier Mastern wurden Silikonwerkzeuge erzeugt und Abformungen vorgenommen. (vgl. Modell in Abbildung 24 links) Die Güte der Strukturen bzw. der

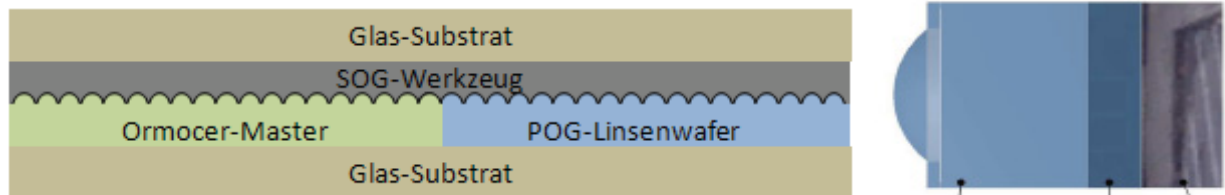


Abbildung 24 Modell der Generationen (links) und Modell des ComiSICK-Designs (rechts: sphärische Linse mit 260µm Scheitelhöhe auf 1,1mm Glaswafer zzgl. Blende)

Strukturwiedergabe wurde anhand von Tastschnittmessungen evaluiert. In Abbildung 25 sind Tastschnitte einer Abformung vom finalen Master dargestellt. Vergleicht man diese mit den Gegebenheiten im Master (vgl. Abbildung 10, zeigt sich eine sehr hohe Übereinstimmung. Da speziell die letzten und insgesamt hochwertigsten Master mit Krümmungsradien unterhalb der Spezifikation ($ROC = 797 \pm 20 \mu\text{m}$) hergestellt wurden, lief man durch die Abformung noch weiter aus der Spezifikation heraus anstatt hinein. Dieser Umstand musste durch eine Vergrößerung des Basislayers ausgeglichen werden. Die Abweichungen der Krümmungsradien vom Master, wie in Tabelle 7 zu sehen, rühren mutmaßlich aus dem Silikonwerkzeug und nicht aus dem Schrumpf des UV-Polymers bei Vernetzen. Wäre letzteres der Fall, müsste eine Vergrößerung des Krümmungsradius (= schwächere Krümmung) zu messen sein, gleichbedeutend mit einer Verringerung der Pfeilhöhe, da der Schrumpf in lateraler Richtung durch die Fixierung am Glassubstrat unterbunden wird.

Tabelle 7 Relativer Verlauf der Krümmungsradien beim #3538 Master und POG-Linsenwafern

		Relativer Verlauf der Krümmungsgradien beim #3538 Master und 1.00-Einschwärzen																							
	Abf #	ROC(x) von oben nach unten [µm]								ROC(x) von links nach rechts [µm]								Min	Avg	Max	shrink	Dev	±%	Dev	±%
Master	X [mm]	10	40	70	100	130	160	190	10	40	70	100	130	160	190	µm	µm	µm							
#3538-D-2	Master	648	731	735	733	742	745	717	703	740	743	737	737	736	671	648	723	745		97	6,7%	14	1,0%		
#3538-D-2	-3 #07	629	699	697	673	698	698	676	704	707	706	704	711	720	665	629	692	720	-4,3%	91	6,6%	47	3,4%		
#3538-D-2	-3 #10	642	692	693	693	698	706	699	704	697	696	697	703	711	672	642	693	711	-4,1%	69	5,0%	19	1,4%		
#3538-D-2	-3 #11	616	692	695	696	705	710	687	690	704	706	701	704	711	655	616	691	711	-4,4%	95	6,9%	19	1,4%		
#3538-D-2	-4 #03	638	706	706	700	709	713	710	686	713	709	706	710	722	678	638	700	722	-3,1%	84	6,0%	22	1,6%		

Im Gegenteil wird jedoch eine Zunahme der Pfeilhöhe gemessen. Dies ist naheliegenderweise durch Aufquellen des Silikonwerkzeugs (durch Eindringen unvernnetzten Harzes) zu erklären. Da das Werkzeug ebenfalls lateral an ein Glassubstrat fixiert ist, kann die Quellung wiederum nur in Z-Richtung erfolgen. Dies ist durchaus konsistent mit den weiter oben genannten Zahlen, da die Acrylate mit ca. 6% Volumenschrumpf ausgewiesen werden, während die verwendeten Epoxide ca. 2,3% schrumpfen sollen. Die Quellung der Silikonwerkzeuge könnte entsprechend mit 3-4% zu Buche schlagen, dürfte jedoch auch abhängig von der eindiffundieren Spezies sein.

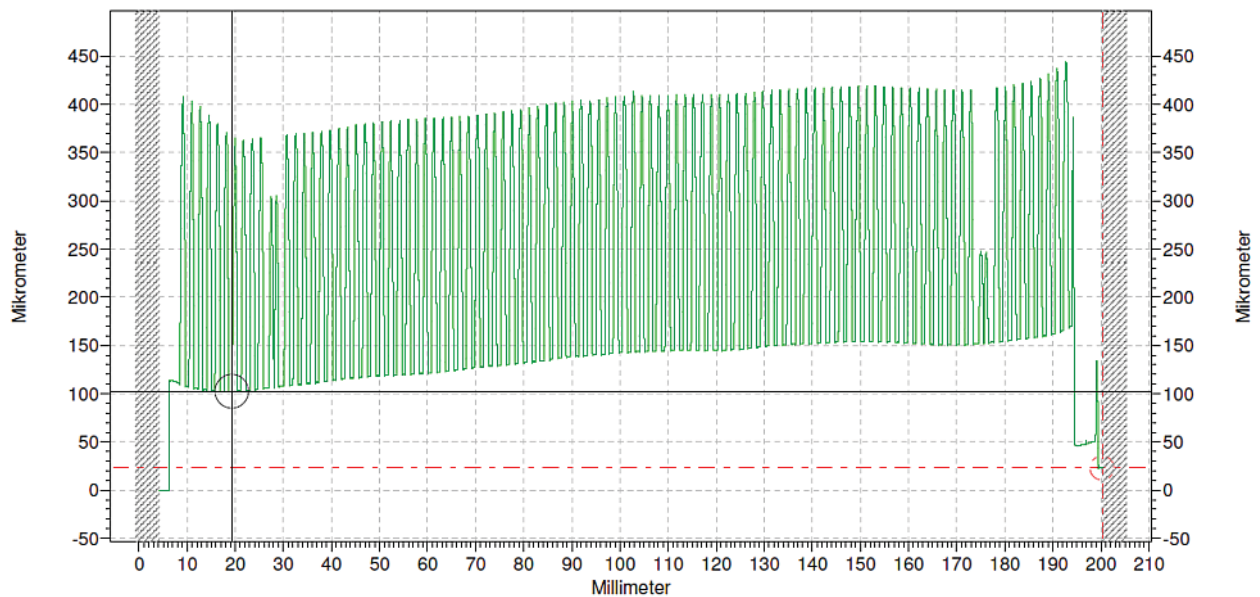


Abbildung 25 Master: #3538-D-2, Werkzeug: -3 Abformung: #11 Tastschnittprofil quer (vlnr)

Es konnte eine Reihe von spezifikationskonformen Linsewafern hergestellt und an Lithoglas versandt werden. (vgl. Abbildung 17, Tabelle 1, Abbildung 26 und den Abschnitt in AP000 zur Erprobung des DOG-MA).

ComiCON640

Vom ComiCon640 wäre ein 3teiliger Mastersatz nötig gewesen. Hiervon wurden mehrere Vorversionen geliefert, die folgende Abstriche aufwiesen:

1. Schritt: A-Master auf Ø200x0,1mm³ Siliziumwafern
 - Eingang bei FO (#1A Ende Mai 2011, #2A/#3A Ende Juni 2011)
 - keine Alignmentmarken
 - Wafer teilbesetzt, Einzellinsen von Softtool gestempelt
 - Spacer als Polymer durch selektive Belichtung (Siebdruckraster)
 - Spacer zwischen Lage 2 & 3 aufgeteilt
 - Abformung in Silikon (Werkzeugherstellung)

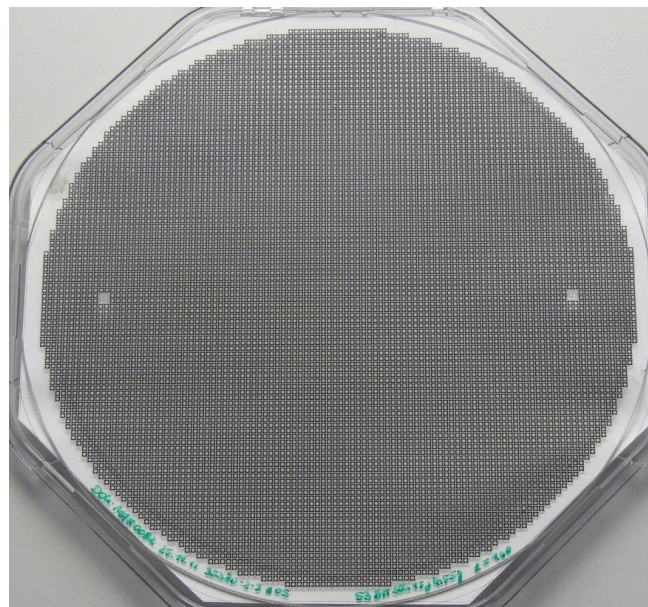


Abbildung 26 Abformung des finalen ComiSICK-Designs auf Blendenwafer zur Übergabe an Lithoglas

Es zeigte sich, dass die Haftung der Polymerschicht auf dem Siliziumsubstrat unzureichend ist und bereits bei einmaliger Silikonabformung zu delaminieren beginnt (siehe Abbildung 27). Der Durchmesser von 200mm erwies sich als zu klein, um Werkzeuge ohne Einbußen an freier Öffnung herstellen zu können. Zugleich ist ein optisch transparenter Master zu bevorzugen, um in der Belichtungsrichtung nicht

eingeschränkt zu werden. Seitens des IOF wurde festgestellt, dass die von einem Softtool gestempelten Einzellinsen im Master nach ca. 100 Zyklen sichtliche Verschleißmarkierungen aufwiesen. Daher wurden für die Testmaster nur repräsentative Bereiche mit Linsen versehen.

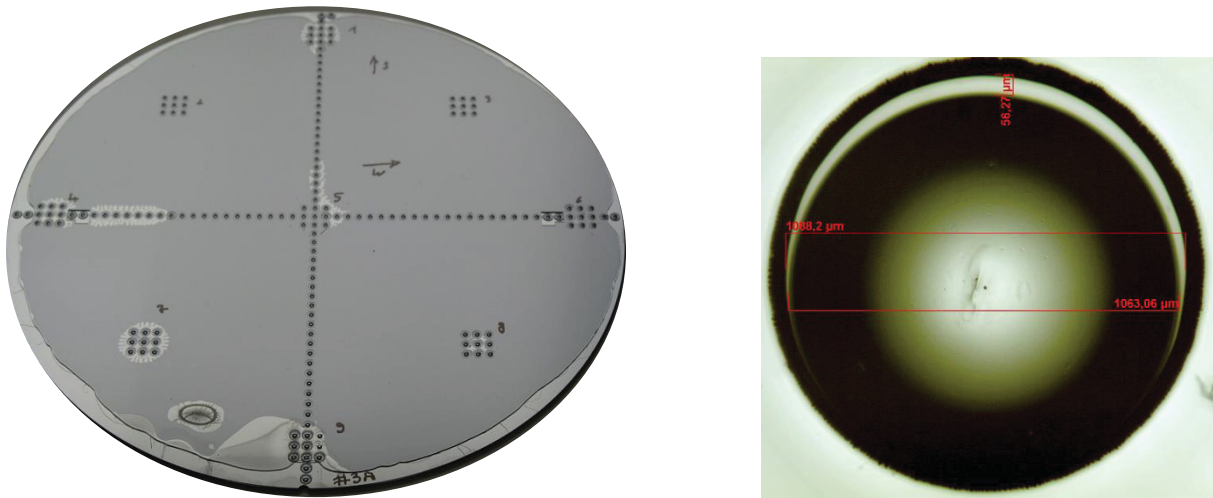


Abbildung 27 ComiCon640 A-Master 3 mit Delaminierungsstellen (links) und Mikroskopbild der Dejustierung des Spacers (rechts)

2. Schritt: B-Master auf Ø220x2mm³ Glaswafern (vgl. Abbildung 28)

- Eingang bei FO (#1B-#3B Anfang August 2011)
- selbe Randbedingungen wie bei A-Mastern
- Abformung in Silikon / Stamping von Linsenwafern

Im zweiten Testdesign zeigten sich Probleme beim Trennen der Strukturen, die auf die Inkorporation steiler Polymerspacerstrukturen zurückzuführen waren. Einesteils muss der Spacer eine gewisse Entformungsschräge aufweisen und sollte zugleich nicht zu hoch sein, andererseits ist es auch von Vorteil, wenn eine durchgehende Polymerschicht am Boden vorhanden ist. Eine solche (aus Ormocomp) ließ sich besser vom verwendeten Silikon trennen als die blanke Glasoberfläche.

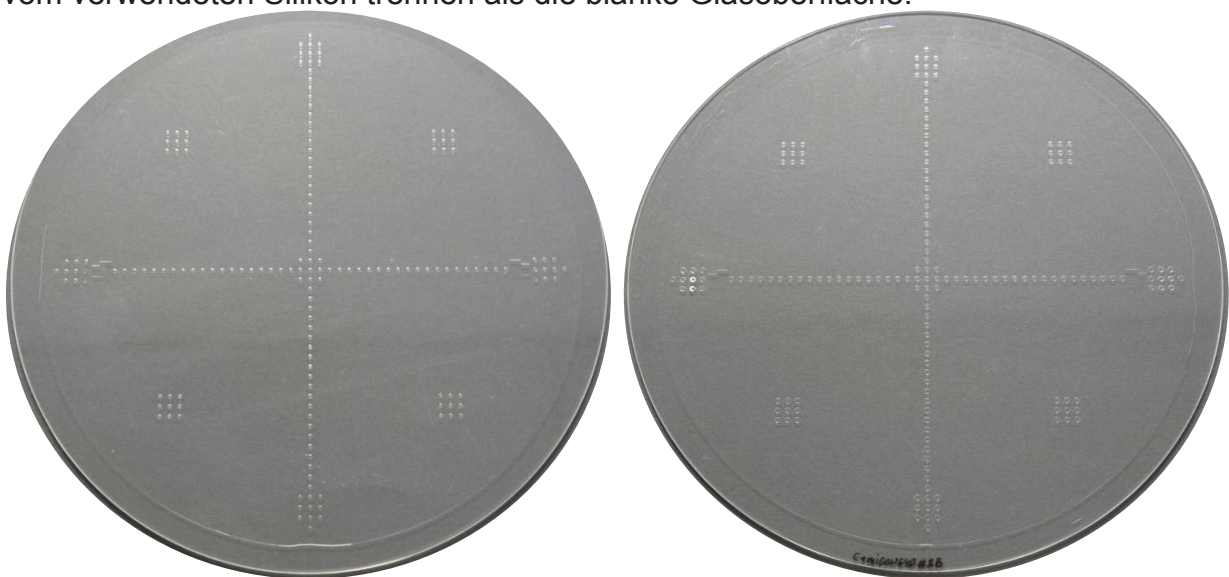


Abbildung 28 ComiCon640 B-Master 1 (links) und 2 (rechts) auf Ø220x2mm³ Glaswafern

Aufgrund der geringen Erfolgsaussichten in anschließenden Schritten (v.a. Bonding und Waferdicing), wurde davon abgesehen, das ComiCon640-Design im Waferlevel auszuführen. Entsprechend wurden keine verwertbaren Master (vollflächig bestempelt inklusive Alignmentstrukturen) vom IOF hergestellt. Die zwischenzeitlich von FO beschafften Glaswafer mit Aperturstopps wurden ans IOF überführt. Dort wurden Einzelkameras damit aufgebaut.

6. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Projekt Comika hat für Fresnel Optics eine Vielzahl verwertbarer Erkenntnisse und Fähigkeiten erbracht. Durch die Vernetzung mit Partnern aus dem Bereich der Halbleiterindustrie konnte der hauseigene Polymer-auf-Glas-Prozess bedeutend weiter entwickelt werden. Die Laufzeiten, um Werkzeuge aus einem Master zu gewinnen, verkürzen sich um mehrere Wochen und die Kosten sinken dabei um ca. eine Größenordnung. Zwar verringern sich die Standzeiten für SOG-Werkzeuge deutlich, jedoch gewinnt man gleichzeitig an geometrischer Genauigkeit (Keilfehler, Ebenheit usw.). SOG-Werkzeuge werden bei Fresnel zukünftig auch für größerformatige Produkte aus dem Bereichen Display und Beleuchtung eingesetzt. Weiterhin konnte der Abformprozess selbst deutlich beschleunigt und qualitativ gesteigert werden. Diese Entwicklungen verbessern die Wettbewerbsfähigkeit von Fresnel Optics und eröffnen neue Produktfelder.

Die Entwicklung des DOG-MA, als eines erweiterbaren Entwicklungstools für hochpräzise POG-Abformungen im 8“-Wafermaßstab erlaubt Fresnel im Bereich der Kunststoffpräzisionsoptik in eine neue Qualitätsklasse vorzustoßen.

Die Versuche zur Entspiegelung der POG-Linsenwafer mit der hauseigenen PlasmAR-Nanostruktur führten erstmals zu reinigbaren/mechanisch belastbaren AR-Strukturen.

Je besser Fresnel die Technologie des POG beherrscht und je wirtschaftlicher der Prozess geführt werden kann, desto mehr Anwendungspotentiale erschließen sich. Im letzten Drittel des Projektes häuften sich entsprechend auch konkrete Kundenanfragen aus verschiedensten Bereichen. Die POG-Technologie dürfte auf Basis dieser Anwendungsbreite innerhalb der nächsten Jahre zu einem weiteren Standbein der Firma werden, selbst wenn nur ein kleiner Teil der Anfragen am Ende in die Serienproduktion mündet.

7. Relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite

Für FOG relevante F&E-Ergebnisse von dritter Seite sind uns nicht bekannt geworden.

8. Eigene Veröffentlichungen

Es wurden keine Veröffentlichungen der Projektergebnisse vorgenommen.